

Resum

Aquest projecte es centra en la caracterització de mescles d'àcid poli(làctic) modificat amb extensors de cadena (REX-PLA), acrilonitril butadiè estirè (ABS) i ABS injectat amb anhidrid maleic (ABS-g-MAH). L'estudi s'ha centrat en tres formulacions diferents en els que varia la quantitat d'ABS-g-MAH utilitzat per tal de compatibilitzar les fases. Les mescles en %pes segons l'ordre: REX-PLA/ABS/ABS-g-MAH són: 70/30/0, 70/27/3 i 70/24/6.

Els materials caracteritzats han sigut fabricats anteriorment al Centre Català del Plàstic, on també s'ha dut a terme aquest projecte [1].

S'ha fet un estudi de caracterització de propietats mecàniques i un estudi morfològic. Per caracteritzar mecànicament els materials s'han fet assajos d'impacte pendular, de tracció i de treball essencial de fractura. L'estudi morfològic mitjançant la microscòpia electrònica (SEM).

En el cas de l'assaig d'impacte pendular s'ha pogut comprovar que en el cas d'un major contingut d'ABS-g-MAH el material té una major tenacitat. Això implica que l'ABS-g-MAH millora el l'adhesió entre fases.

Pel que fa a l'estudi morfològic s'ha dut a terme en les plaques injectades. S'ha pogut concloure que les plaques tenen una morfologia laminar en orientació al flux. També s'ha determinat que un augment de la concentració d'anhidrid maleic fa que disminueixi la mida del domini de les fases d'ABS, de tal forma que es pot comprovar que ajuda a que aquestes fases es compatibilitzin.

En el cas de l'assaig de tracció s'ha pogut comprovar que tant la tensió com l'elongació de fluència de les tres mescles és el mateix, així com el mòdul d'elasticitat. La gran diferència entre els materials s'ha vist en la deformació plàstica, on el material amb composició 70/30/0 (Bioblend 0) ha tingut una elongació a ruptura significativament menor a la del material 70/27/3 (Bioblend 3).

Pel que fa a l'assaig de treball essencial de fractura s'ha fet un estudi preliminar per comprovar que es compleixen les condicions per estudiar el treball essencial de fractura i a continuació s'ha procedit a fer una sèrie de proves dels materials Bioblend 0 i 3. En el cas del Bioblend 0 no s'han aconseguit resultats vàlids degut a que en diferents casos les proves han trencat de forma fràgil o la propagació de l'esquerda no ha sigut en la direcció de l'entalla. Pel que fa al material Bioblend 3 tan sols s'han aconseguit quatre proves vàlides però en el moment de calcular el treball essencial de fractura no s'han obtingut resultats vàlids.



Sumari

RESUM	2
SUMARI	4
1. ÍNDEX DE TAULES	7
2. ÍNDEX DE FIGURES	8
3. GLOSSARI	13
4. INTRODUCCIÓ	17
4.1. Objectius del projecte	17
4.2. Abast del projecte	17
5. MEMÒRIA DESCRIPTIVA	18
5.1. Materials.....	18
5.1.1. El PLA i el REX-PLA	18
5.1.2. L'ABS.....	18
5.1.3. ABS-g-MAH.....	19
5.1.4. REX-PLA/ ABS.....	19
5.2. Antecedents	20
5.3. Mètodes experimentals.....	20
5.3.1. Mostres utilitzades	20
5.3.2. Assaig d'impacte pendular.....	21
5.3.3. Morfologia: Microscòpia SEM.....	24
5.3.4. Assaig de tracció	25
5.3.5. Assaig de treball essencial de fractura (EWF)	27
6. RESULTATS I DISCUSSIONS	32
6.1. Plaques	32
6.1.1. Assaig de mecànica de la fractura	32
6.1.2. Morfologia: Microscòpia SEM.....	50
6.2. Films.....	63
6.2.1. Tracció	63
6.2.2. EWF	67
7. COST DEL PROJECTE	72
8. IMPACTE MEDIAMBIENTAL	73
CONCLUSIONS	74



CONTINUACIÓ DE L'ESTUDI	75
AGRAÏMENTS	76
BIBLIOGRAFIA	77
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTÀRIA	79
ANNEXES	I
A. FITXES TÈCNIQUES DEL PLA I L'ABS DEL CES EDUPACK 2013.....	I
A.1 PLA I	
A.2 ABS	V
B. FOTOGRAFIES DE LES PROVETES ASSAJADES	VIII
B.1 Resultats de l'assaig d'impacte pendular	VIII
B.2 Resultats de l'assaig de tracció.....	XVII
B.3 Resultats de l'assaig de treball essencial de fractura	XXV

1. Índex de taules

Taula 1: Formulació de les mescles estudiades en aquest projecte.....	20
Taula 2: Resultats dels càlculs de resistència a l'impacte	33
Taula 3: : Resultats dels càlculs de K_{IC}	33
Taula 4: Resultats dels càlculs de G_c	34
Taula 5: Paràmetres resultants de l'assaig de tracció.....	65

2. Índex de figures

Figura 1: Unitat repetitiva del PLA [2]	18
Figura 2: Unitats repetitives de l'ABS: d'esquerra a dreta acrilonitril, el butadiè i l'estirè [2]. .	19
Figura 3: Estructura molecular de l'anhídrid maleic. Extret de la Font [2]	19
Figura 4: Configuració de l'assaig d'impacte. Extret de la font [12]	22
Figura 5: Esquema de la situació en la placa de les provetes utilitzades. En vermell les provetes descartades i en negre les provetes assajades.....	22
Figura 6: Localització de la zona de les plaques d'on s'han extret les mostres de microscòpia electrònica	24
Figura 7: Esbós de la situació de les provetes encunyades en el film.....	26
Figura 8: Esquema d'una proveta DDENT. Obtinguda de la font [14]	29
Figura 9: Esquema d'una proveta de treball essencial de fractura assajada mostrant la zona de deformació plàstica. Extret de la font [13].	31
Figura 10: Registres Carga-temps típics de les diferents composicions estudiades	32
<i>Figura 11: Imatge composta de la superfície de fractura de REX-PLA</i>	<i>34</i>
Figura 12: Micrografia de la superfície de fractura de REX-PLA en un assaig d'impacte pendular. Augment de x200.....	35
Figura 13: Micrografia de la superfície de fractura de REX-PLA en un assaig d'impacte pendular. Augment de x1000.....	35
Figura 14: Imatge composta de la superfície de fractura de Bioblend 0 zona lateral	36
Figura 15: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 0 zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x200	36
Figura 16: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 0 zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x1000.....	37
Figura 17: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 0 zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x5000.....	37

Figura 18: Imatge composta de la superfície de fractura de Bioblend 0 zona central.....	38
Figura 19: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 0 zona central en un assaig d'impacte pendular. Augment de x200	38
Figura 20: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 0 en zona central en un assaig d'impacte pendular. Augment de x1000	39
Figura 21: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 0 en zona central en un assaig d'impacte pendular. Augment de x5000	39
Figura 22: Imatge composta de la superfície de fractura de Bioblend 3 zona lateral.....	40
Figura 23: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 3 zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x200	40
Figura 24: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 3 zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x1000	41
Figura 25: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 3 zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x5000	41
Figura 26: Imatge composta de la superfície de fractura de Bioblend 3 zona central.....	42
Figura 27: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 3 zona central en un assaig d'impacte pendular. Augment de x200	42
Figura 28: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 3 zona central en un assaig d'impacte pendular. Augment de x1000	43
Figura 29: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 3 zona central en un assaig d'impacte pendular. Augment de x5000	43
Figura 30: Imatge composta de la superfície de fractura de Bioblend 6 zona lateral.....	44
Figura 31: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 6 zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x200	44
Figura 32: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 6 zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x1000	45
Figura 33: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 6 zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x5000	45

Figura 34: Imatge composta de la superfície de fractura de Bioblend 6 zona central	46
Figura 35: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 6 zona central en un assaig d'impacte pendular. Augment de x200.....	46
Figura 36: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 6 zona central en un assaig d'impacte pendular. Augment de x1000.....	47
Figura 37: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 6 zona central en un assaig d'impacte pendular. Augment de x5000.....	47
Figura 38: Imatge composta de la superfície de fractura de la mostra de ABS central	48
Figura 39: Micrografia de la superfície de fractura d'ABS zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x200.....	48
Figura 40: Micrografia de la superfície de fractura d'ABS zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x1000.....	49
Figura 41: Micrografia de la superfície de fractura d'ABS zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x5000.....	49
Figura 42: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 0. Mostra tallada en direcció TD, mostrant la direcció MD en un punt mig respecte el punt d'injecció. Mostra recoberta de tàntal. x1500 augments.....	50
Figura 43: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 0. Mostra tallada en direcció TD, mostrant la direcció MD en un punt mig respecte el punt d'injecció. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments.....	51
Figura 44: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 0. Mostra tallada en direcció TD, mostrant la direcció MD en un punt mig respecte el punt d'injecció. Mostra recoberta de tàntal. x10000 augments.....	52
Figura 45: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 0. Mostra tallada en direcció TD, mostrant la direcció MD en un punt mig respecte el punt d'injecció, proper a la superfície de la placa. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments.....	52
Figura 46: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 0. Mostra tallada en direcció MD, mostrant la direcció TD en la zona central. Mostra recoberta de tàntal. x1500 augments	53
Figura 47: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 0. Mostra tallada en direcció MD, mostrant la direcció TD en la zona central. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments	54

- Figura 48: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 0. Mostra tallada en direcció MD, mostrant la direcció TD en la zona central, més propera a la superfície de la placa. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments54
- Figura 49: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 6. Mostra tallada en direcció TD, mostrant la direcció MD en un punt mig respecte el punt d'injecció. Mostra recoberta de tàntal. x1500 augments55
- Figura 50: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 6. Mostra tallada en direcció TD, mostrant la direcció MD en un punt mig respecte el punt d'injecció. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments56
- Figura 51: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 6. Mostra tallada en direcció TD, mostrant la direcció MD en un punt mig respecte el punt d'injecció, proper a la superfície de la placa. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments.56
- Figura 52: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 6. Mostra tallada en direcció MD, mostrant la direcció TD en la zona central. Mostra recoberta de tàntal. x1500 augments.....57
- Figura 53: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 6. Mostra tallada en direcció MD, mostrant la direcció TD en la zona central. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments.....58
- Figura 54: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 6. Mostra tallada en direcció MD, mostrant la direcció TD en la zona central, més propera a la superfície de la placa. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments58
- Figura 55: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 3. Mostra tallada en direcció TD, mostrant la direcció MD en un punt mig respecte el punt d'injecció. Mostra recoberta de tàntal. x1500 augments59
- Figura 56: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 3. Mostra tallada en direcció TD, mostrant la direcció MD en un punt mig respecte el punt d'injecció. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments60
- Figura 57: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 3. Mostra tallada en direcció TD, mostrant la direcció MD en un punt mig respecte el punt d'injecció, proper a la superfície de la placa. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments.60
- Figura 58: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 3. Mostra tallada en direcció MD, mostrant la direcció TD en la zona central. Mostra recoberta de tàntal. x1500 augments.....61
- Figura 59: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 3. Mostra tallada en direcció MD, mostrant la direcció TD en la zona central. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments.....62

Figura 60: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 3. Mostra tallada en direcció MD, mostrant la direcció TD en la zona central, més propera a la superfície de la placa. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments.....	62
Figura 61: D'esquerra a dreta, evolució temporal en l'assaig de tracció: moment d'iniciar l'assaig, moment en que es passa el punt de fluència, formació del coll i deformació màxima abans d'arribar a ruptura.....	63
Figura 62: Resultats de les provetes amb 0% d'ABS-g.....	64
Figura 63: Resultats de les provetes amb 3% d'ABS-g.....	64
Figura 64: Resultat i camps de deformació durant la prova de l'assaig preliminar de treball essencial de fractura amb la mostra de Bioblend 0	67
Figura 65: Resultat i camps de deformació durant la prova de l'assaig preliminar de treball essencial de fractura amb la mostra de Bioblend 3.....	68
Figura 66 Resultat i camps de deformació durant la prova de l'assaig preliminar de treball essencial de fractura amb la mostra de Bioblend 6	69
Figura 67: Superposició dels assajos preliminars de treball essencial de fractura dels tres materials	70
Figura 68: Resultats del càlcul del treball essencial de fractura, on es mostra que el resultat no és vàlid degut a que la intersecció en l'eix vertical és inferior a 0, cosa que no és possible.	71

3. Glossari

a	longitud d'entalla
A	Coeficient relacionat amb α (a/W)
ABS	acrilonitril butadiè estirè
ABS-g-MAH	acrilonitril butadiè estirè injectat amb anhidrid maleic
B	gruix
Bioblend 0	mescla de REX-PLA/ABS/ABS-g-MAH amb una composició en pes de 70/30/0
Bioblend 3	mescla de REX-PLA/ABS/ABS-g-MAH amb una composició en pes de 70/27/3
Bioblend 6	mescla de REX-PLA/ABS/ABS-g-MAH amb una composició en pes de 70/24/6
DMTA	Anàlisis mecànic-tèrmic-dinàmic
dt	diferencial de temps
E	mòdul d'elasticitat
E(t)	Energia en l'instant de temps t
EWf	treball essencial de fractura (Assaig) (Essential Work of Fracture)
f	factor que relaciona la distància entre suports amb l'amplada de la proveta corregit per un polinomi funció d' α
F(t)	Força en l'instant de temps t
Gc	Energia de fractura
H	alçada de la proveta
h	distància entre mordasses
k	constant per calcular beta, $k=1,5$

K_{IC}	Resistència a la fractura en mode I
l	longitud
l	longitud de lligament
l₀	longitud inicial
m	massa
MD	Direcció de la màquina (Machine Direction)
PLA	àcid polilàctic
P_q	Força màxima
REX-PLA	àcid polilàctic modificat per extrusió reactiva
REX-PLA/ABS/ABS-g-MAH	Família de mescles d'àcid polilàctic modificat per extrusió reactiva, acrilonitril butadiè estirè i acrilonitril butadiè estirè injectat amb anhidrid maleic
RI	Resistència a l'impacte
r_p	Radi plàstic
S	distància entre suports
SAmfE	agent oligomèric estirè-acrílic epòxid-multifuncional
SAN-GMA	copolímer estirè/acrilonitril/glicidil metacrilat
SEM	microscopi electrònic de rastreig (Scanning Electronic Microscope)
t	temps
t	gruix de la proveta de film
TD	Direcció transversal a la de la màquina (Transversal Direction)
V₀	Velocitat inicial
w	amplada

w_e	treball essencial de fractura (Valor)
W_e	Treball absorbit en la zona de fractura en un assaig de EWF
w_e	Treball específic absorbit en la zona de fractura en un assaig de EWF
W_f	Treball de fractura
w_f	treball específic de fractura
W_p	Treball absorbit en forma de deformació plàstica en un assaig d'EWF
w_p	treball específic absorbit en forma de deformació plàstica en un assaig d'EWF
$X(t)$	posició en l'instant de temps t
α	relació de longitud entre l'entalla i l'amplada de la proveta
β	factor de forma
ε	deformació
σ	Tensió
$\sigma_{0,0005}$	tensió quan l'elongació és de 0,0005
$\sigma_{0,0025}$	tensió quan l'elongació és de 0,0025
σ_y	tensió de cadència
Φ	factor de calibratge d'energia

4. Introducció

4.1. Objectius del projecte

Aquest projecte forma part del projecte MAT2013-40730-P finançat pel ministeri d'economia i competitivitat d'Espanya. L'objectiu d'aquest projecte és caracteritzar mostres de REX-PLA/ABS/ABS-g-MAH fabricades anteriorment al Centre Català del Plàstic en el projecte final de carrera de Nil Constans [1] per tal de saber si l'anhídrid maleic de l'ABS-g-MAH aconseguix generar una interfase que compatibilitzi el PLA i l'ABS. Per tal de poder referenciar els resultats de les meses s'utilitzarà com a de les mescles REX-PLA i ABS la paraula Bioblend seguida del número 0, 3 o 6 segons el contingut d'ABS-g-MAH. Els materials estudiats estan en dos formats diferents: plaques i films.

4.2. Abast del projecte

- **Caracterització de plaques**
 - Caracteritzar mecànicament els diferents materials comprovant com varia el seu comportament segons cada composició mitjançant assajos de mecànica de la fractura d'impacte pendular.
 - Analitzar les diferències morfològiques entre els tres diferents materials mitjançant microscòpia SEM
- **Caracterització de films**
 - Caracteritzar mecànicament els diferents materials en forma de film mitjançant assajos de tracció i de treball essencial de fractura.

5. Memòria descriptiva

5.1. Materials

5.1.1. El PLA i el REX-PLA

El PLA és un polímer d'origen renovable i biodegradable. És utilitzat de forma molt àmplia en el camp biomèdic gràcies a que també és biocompatible. Tot i així presenta una resistència baixa per a ser utilitzat en altres camps d'aplicacions.

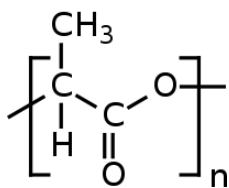


Figura 1: Unitat repetitiva del PLA [2]

Per tal de millorar les propietats mecàniques del PLA s'ha estat estudiant com modificar-lo. Una opció que s'ha utilitzat és fer servir l'agent SAMfE, o agent oligomèric estirè-acrílic epoxi-multifuncional. Aquest agent s'utilitza per tal d'estendre les cadenes del PLA unint-les entre elles transformant el PLA a una estructura ramificada. Aquest procés es duu a terme mitjançant l'extrusió reactiva del PLA juntament amb el SAMfE, fent que el PLA es modifiqui la seva estructura durant un procés de extrusió.[3]

El PLA utilitzat en aquest projecte és PLA modificat per extrusió reactiva (REX-PLA) modificat en el mateix Centre Català del Plàstic.

5.1.2. L'ABS

L'ABS o acrilonitril butadiè estirè és un terpolímer termoplàstic amorf desenvolupat durant la dècada dels 50 sent un dels primers polímers reforçats. Està format per una terna de polímers: poliestirè juntament amb butadiè i estirè. S'utilitza en un gran ventall d'aplicacions a la indústria des de encapsulats d'aparells electrònics fins a la fabricació de components en automoció.

Les seves propietats mecàniques varien en funció de les proporcions de cadascun dels seus components. En el cas d'aquest projecte s'ha utilitzat Terluran® GP-22 de Styrolution, un ABS d'alta resistència a l'impacte, dissenyat per un ample rang d'aplicacions.

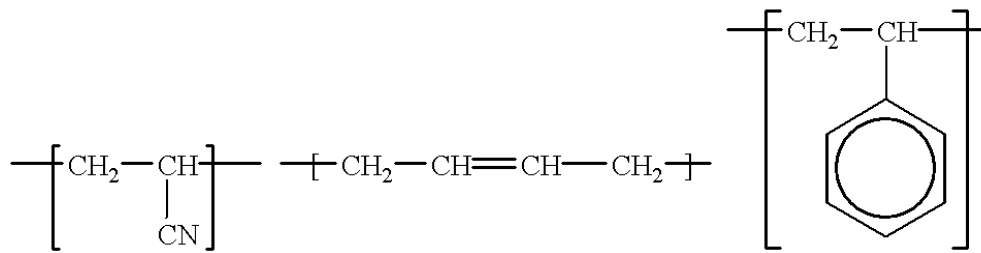


Figura 2: Unitats repetitives de l'ABS: d'esquerra a dreta acrilonitril, el butadiè i l'estirè [2].

5.1.3. ABS-g-MAH

L'ABS-g-MAH és un grau d'ABS que conté anhídrid maleic. L'anhídrid maleic s'utilitza com a agent compatibilitzador de fases que en cas contrari serien incompatibles. L'ABS-g-MAH que s'utilitzarà per dur a terme aquest projecte és el Bondyram® 6000 de Polyram. Aquest ABS conté un percentatge en pes d'anhídrid maleic d'entre el 0,6% i el 1%.

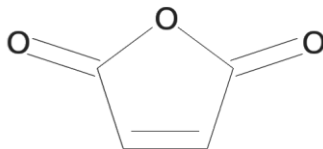


Figura 3: Estructura molecular de l'anhídrid maleic. Extret de la Font [2]

5.1.4. REX-PLA/ ABS

Per tal de millorar les propietats mecàniques del REX-PLA es busca utilitzar una fase d'ABS. Gràcies a l'alta resistència a impacte de l'ABS la mescla ha de millorar significativament la seva tenacitat.

El PLA i l'ABS són materials immiscibles. Això implica que les dues fases per les que estaria compost el material no estiguin enllaçades, cosa que implicaria que la interfase del material seria dèbil i per tant el material no seria resistent. Per tal d'evitar aquest impàs s'utilitza l'ABS-g-MAH per tal que reaccioni amb el REX-PLA i l'ABS enllaçant-los i creant una interfase més forta.

Les composició de les mescles estudiades figuren a la Taula1:

Taula 1: Formulació de les mescles estudiades en aquest projecte.

Mescla	%pes de REX-PLA	%pes d'ABS	%pes d'ABS-g-MAH
Bioblend 0	70	30	0
Bioblend 3	70	27	3
Bioblend 6	70	24	6

5.2. Antecedents

Actualment s'estan buscant diferents opcions per tal de millorar les propietats mecàniques del PLA. Al centre català del plàstic s'ha estat treballant en la modificació de la seva estructura mitjançant l'extrusió reactiva [3-6]. També s'ha estudiat copolimeritzar el PLA amb altres termoplàstics. Entre aquests termoplàstics hi ha la poliamida PA610 [8] i com també és el cas d'aquest treball fi de grau l'ABS [9-11]. En ells s'han utilitzat altres compatibilitzadors com el SAN-GMA o les resines epoxi.

5.3. Mètodes experimentals

Per tal de caracteritzar els nostres materials s'utilitzarà un gran ventall de proves diferents. Des de caracterització reològica fins a caracterització de propietats mecàniques.

5.3.1. Mostres utilitzades

Els materials utilitzats són REX-PLA, ABS, REX-PLA/ABS/ABS-g-MAH 70/30/0 (a partir d'ara Bioblend 0) REX-PLA/ABS/ABS-g-MAH 70/27/3 (a partir d'ara Bioblend 3) i REX-PLA/ABS/ABS-g-MAH 70/24/6 (Bioblend 6).

Per tal de caracteritzar els materials s'han utilitzat provetes en forma de plaques i en forma de films. En ambdós casos fabricats prèviament a l'inici d'aquest projecte al Centre Català del Plàstic.

5.3.1.1. Plaques

Les plaques s'han fabricat per injecció. Tenen unes dimensions de 100x100x3mm³. Els materials que estan en forma de placa són REX-PLA, ABS i els Bioblend 0,3 i 6. Cal tenir en compte que en el cas de les plaques de Bioblend 0, 3 i 6 hi ha una estructura pell nucli en el material.

5.3.1.2. Films

Els films han sigut fabricats per extrusió calandrat. Tenen una amplitud de 100mm i un espessor d'entre 300 i 800µm. Aquesta diferència de gruix és deguda a certes irregularitats en el procés de fabricació. Pel que fa a l'acabat dels films cal destacar que degut a les dificultats de processament hi ha certes irregularitats en els films, especialment en el cas del Bioblend 6. Per tal d'evitar resultats erronis s'han evitat els defectes alhora de mecanitzar les provetes. Els materials en forma de film són els Bioblend 0, 3 i 6.

5.3.2. Assaig d'impacte pendular

5.3.2.1. Maquinària utilitzada i condicions de l'assaig

Per l'estudi dels assajos d'impacte pendular s'ha utilitzat un pèndul Charpy de la marca CEAST. Aquesta màquina proporciona dades de força i temps. Per tal de fer més senzill l'anàlisi dels resultats es procurarà treballar en condicions quasi-estàtiques (assegurant-nos que $V \geq 0,9V_0$) per tal de poder utilitzar les següents relacions:

$$X(t) = \int_0^t \left(V_0 - \int_0^t \frac{F(t)}{m} dt \right) dt$$

$$E(t) = \int_0^t (F(t)) \left(V_0 - \int_0^t \frac{F(t)}{m} dt \right) dt$$

Degut a que els polímers tenen un comportament viscoelàstic els resultats d'assajos d'impacte pendular en polímers presenten efectes dinàmics. Això comporta que en el registre de la força en l'assaig es presentin unes interferències en forma d'oscil·lacions. Això pot comportar tenir uns resultats dels quals no és possible aconseguir. Per tal d'evitar aquest fenomen s'utilitza un amortidor elastòmer que absorbeix les vibracions causades, fent que es pugui comprendre els resultats de la força en funció del temps.

Les condicions dels assajos son:

- Massa del pèndul: 3,668kg
- Velocitat d'impacte: 1m/s
- Energia d'impacte: 1,80J
- Angle inicial del pèndul: 30°
- Distància entre suports: 50,12mm
- Temperatura de la sala: 26°C

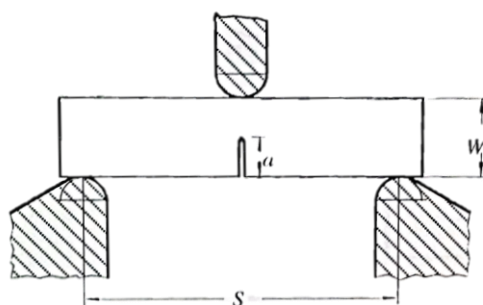


Figura 4: Configuració de l'assaig d'impacte. Extret de la font [12].

Una vegada finalitzats els assajos s'utilitzarà una lupa binocular per observar i mesurar amb el seu micròmetre les dimensions superfícies de fractura de les provetes.

5.3.2.2. Preparació de les provetes

En aquest assaig s'han analitzat el REX-PLA, ABS, i els Bioblend 0, 3 i 6. Les provetes s'han fet a partir de les plaques injectades. Les plaques s'han tallat en vuit provetes diferents tal i com es mostra en la Figura 5, en el sentit de propagació del material alhora de ser injectades utilitzant una serra de cinta. S'han identificat les provetes amb una lletra, per ordre alfabètic, per saber a quina situació de la placa injectada correspon cada proveta.

S'han seleccionat les provetes C, D, E i F per analitzar-les, essent C i F les provetes laterals i D i E les provetes situades a la posició central de la placa. La resta de les provetes s'han descartat degut a que el flux era molt irregular en el moment de ser injectades i es creu que podrien portar a resultats erronis o amb una desviació elevada. En el cas del REX-PLA, al tenir els paràmetres d'injecció coneguts per a tenir uns bons resultats no s'estudiaran per centre i lateral ja que les seves propietats són homogènies. Posteriorment les provetes s'han rectificat amb paper de vidre, s'han entallat amb una serra de disc i finalment s'han aguditzat amb una fulla d'afaitar. S'han assajat un total de dotze provetes per material.

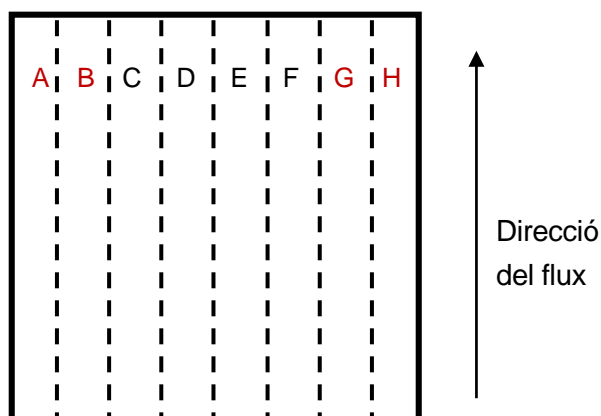


Figura 5: Esquema de la situació en la placa de les provetes utilitzades. En vermell les provetes descartades i en negre les provetes assajades.

5.3.2.3. Càlculs realitzats

Amb aquest assaig s'aconsegueix obtenir la resistència a impacte, la K_{IC} , la G_C i la resistència a l'impacte.

Per tal de trobar la resistència a l'impacte s'ha utilitzat el següent càlcul:

$$RI = \frac{U_{total}}{B(W - a)}$$

Per tal de calcular la K_{IC} s'ha utilitzat el següent càlcul:

$$f = \frac{S}{W} \cdot \frac{3\alpha^{3/2}}{2(1 - \alpha)^{3/2}} \cdot \left(1,99 - 1,33\alpha - (3,49 - 0,68\alpha + 1,35\alpha^2) \cdot \left(\frac{\alpha(1 - \alpha)}{(1 + \alpha)^2} \right) \right)$$

$$\alpha = \frac{a}{W}$$

$$\frac{P_q}{BW^{1/2}} = K_{IC} \cdot \frac{1}{f}$$

On P_q és la Força màxima, B és l'espessor, W és l'amplada de la proveta i f és la funció que relaciona l'efecte de la relació entre l'amplada i l'espessor amb la K_{IC} .

On S és la distància entre suports, W és l'amplada de la proveta, α és la relació entre la profunditat de l'entalla i l'amplada de la proveta i a és la profunditat d'entalla.

Per tal de calcular la G_C s'ha utilitzat les següents relacions:

$$G = \frac{U|_{F_{max}}}{BW\phi}$$

On $U|_{F_{max}}$ és l'energia absorbida fins el moment en que tenim la força màxima, W és l'amplada de la proveta, B és el gruix i ϕ el factor de calibratge d'energia.

Cal recordar que ϕ és definit com:

$$\phi = \frac{A + 18,64}{dA/d\alpha}$$

i A i $dA/d\alpha$ és donat pels següents polinomis funció d' α :

$$A = \frac{16\alpha^2}{(1-\alpha)^2} \cdot [8,9 - 33,717\alpha + 79,616\alpha^2 - 112,952\alpha^3 + 84,815\alpha^4 - 25,672\alpha^5]$$

$$\frac{dA}{d\alpha} = \frac{16\alpha^2}{(1-\alpha)^2} \cdot [-33,717 + 79,616\alpha - 112,952\alpha^2 + 84,815\alpha^3 - 25,672\alpha^4] +$$

$$16 \cdot [8,9 - 33,717\alpha + 79,616\alpha^2 - 112,952\alpha^3 + 84,815\alpha^4 - 25,672\alpha^5]$$

5.3.3. Morfologia: Microscòpia SEM

5.3.3.1. Maquinària utilitzada i condicions de l'assaig

La microscòpia SEM o microscòpia electrònica de rastreig, és una tècnica en la que s'utilitza un feix d'electrons enlloc d'un feix de llum per tal de formar la imatge. En cas de que les mostres a observar no siguin conductores se'ls hi fa un tractament abans de ser observades que consisteix a superposar-hi una pel·lícula fina de tàntal per tal de que els electrons interactuin millor amb la mostra i s'aconsegueixin millors imatges. L'aparell amb el que s'han dut a terme aquests assajos és el model JEOL JSM-7001F. S'han fet micrografies a una resolució de 2kV. S'han fet ampliacions de x1000, x5000 i x10000.

5.3.3.2. Preparació de les provetes

S'han pres mostres de plaques de Bioblend 0, Bioblend 3 i Bioblend 6. Les provetes s'han extret tallant en direcció MD i en TD, d'aquesta forma es pot observar la morfologia en TD i MD respectivament. Per tal de que es puguin identificar millor les diferents fases en el material aquest s'ha recobert amb tàntal per tal de que la mostra sigui conductora.

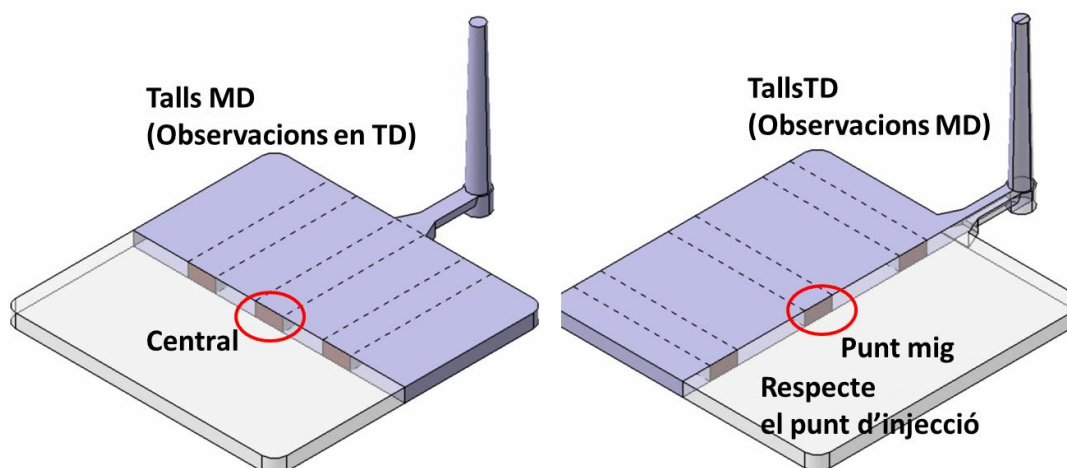


Figura 6: Localització de la zona de les plaques d'on s'han extret les mostres de microscòpia electrònica

5.3.4. Assaig de tracció

5.3.4.1. Maquinària utilitzada i condicions de l'assaig

Per tal de conèixer les propietats mecàniques dels materials a caracteritzar es faran assajos de tracció dels films. La normativa a seguir serà la ASTM D638-02a. Les provetes utilitzades seran del Tipus IV i s'obtindran per encunyat. La màquina d'assajos dinamomètrics utilitzada és una Sun 2500 de la marca Galdabini. Per tal de mesurar la deformació del material s'utilitza un videoextensòmetre.

Els paràmetres del test són:

- Velocitat de desplaçament entre mordasses: 10mm/min
- Cel·la de carga: 1kN.
- Ús de mordasses d'alumini per a films. Per tal d'augmentar la força de fregament entre les mordasses i les provetes i evitar que llisquin de la mordassa s'ha posat paper de vidre entre les mordasses i les provetes.

5.3.4.2. Preparació de les provetes

Els films utilitzats són els de Bioblend 0 i 3. No s'ha assajat el Bioblend 6 degut a que el film presentava irregularitats importants a la superfície que podrien dificultar el fet d'obtenir assajos vàlids.

Les provetes s'han obtingut encunyant-les. S'han extret provetes de 4 zones del film: tres zones en direcció MD: zona central del film i de cadascun dels laterals i en direcció TD. Després de ser encunyades les provetes s'han marcat les marques de la longitud inicial amb un marcador indeleble al centre de la proveta, separades entre elles per una distància de 25mm.

Per calibrar l'espessor de les provetes s'ha utilitzat un mesurador d'espessors Mega Check 5F-ST. Les dimensions de les provetes superiors al mil·límetre de gruix s'han mesurat utilitzant un peu de rei digital.

S'han fet assajos fins a poder assegurar-se que hi ha hagut un total de com a mínim set assajos vàlids per material.

La denominació de les provetes s'anomena per cada zona és:

- E: direcció MD costat esquerra
- C: direcció MD zona central
- D: direcció MD costat dret
- TD: direcció TD

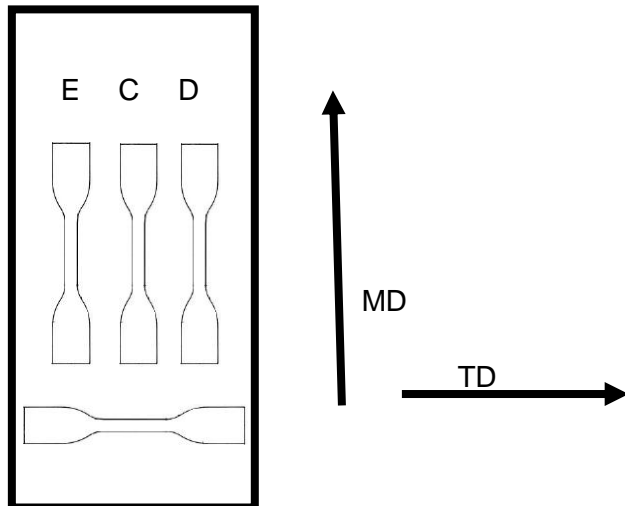


Figura 7: Esbós de la situació de les provetes encunyades en el film

5.3.4.3. Càlculs realitzats

Amb les dades obtingudes de l'assaig s'ha estudiat el gràfic tensió deformació per tal de calcular la tensió de fluència, la elongació en la tensió de fluència i el mòdul d'elasticitat.

Per tal de trobar la tensió s'ha dividit la força instantània per l'amplada i el gruix de la zona central de la proveta.

$$\sigma = \frac{F}{wt}$$

Per tal de trobar l'elongació s'ha dividit la longitud instantània entre les línies marcades per la seva longitud inicial. Aquestes dades són donades pel videoextensòmetre.

$$\varepsilon = \frac{l}{l_0}$$

Una vegada trobada la tensió i la elongació s'ha graficat la corba. En el cas que la corba presentés un peu en l'inici de l'assaig s'ha eliminat ja que aquest es considera un artefacte de l'assaig. [12]

Una vegada corregida la corba s'ha buscat el punt de fluència, sabent que aquest es defineix com el primer punt en el que s'aconsegueix un increment d'elongació sense un increment de tensió.

Seguidament s'ha buscat l'elongació a ruptura sent aquesta la elongació màxima suportada per la proveta abans de trencar.

Finalment s'ha calculat el mòdul d'elasticitat segons la fórmula:

$$E = \frac{\sigma_{0,0025} - \sigma_{0,0005}}{0,0025 - 0,0005}$$

5.3.5. Assaig de treball essencial de fractura (EWF)

5.3.5.1. Maquinària utilitzada i condicions de l'assaig

El mètode de treball essencial de fractura és una tècnica que ens permet estudiar el comportament del material posterior al punt de fluència del material. Per tal d'utilitzar aquest mètode cal assegurar-se que les provetes a assajar compleixin un seguit de requisits [13]:

- El lligament ha d'haver cedit totalment abans de que la fractura propagui pel lligament.
- Les provetes han d'estar subjectes a un estat de tensions pla.
- La corba carga – desplaçament ha de ser similar entre totes les provetes per una sèrie de lligaments de diferent llargada.
- Els lligaments han d'estar entre el següent rang:

$$\max(3t - 5mm) < l < \min\left(\frac{W}{3}, 2r_p\right)$$

Essent W l'amplada de la proveta DDENT i r_p el radi plàstic definit com:

$$2r_p = \frac{\pi E w_e}{8 \sigma_y^2}$$

Per saber si els materials a estudiar compleixen els requisits per tal de poder estudiar el treball essencial de fractura s'han fet unes probes inicials amb la màquina Zwick/Roell Amsler HC25, que disposa d'un dispositiu de captacions d'imatge d'alta freqüència que permet analitzar el camp de deformacions en qualsevol instant de temps en el que s'està realitzant l'assaig..

Els assajos s'han dut a terme segons les condicions següents:

- Velocitat de desplaçament entre mordasses: 1mm/min
- cèl·lula de 25 kN.

S'ha utilitzat aquesta cel·la de carga tot i treballar en films ja que durant els assajos la màquina estava sol·licitada per doctorands i altres projectistes que treballaven amb aquesta cèl·lula de carga i no es podia reduir el temps disponible de la màquina canviant-la. Com que tan sols es desitjava un resultat qualitatiu i no quantitatiu en aquest primer assaig no s'ha estimant necessari canviar la cèl·lula.

Per tal de dur a terme els assajos de treball essencial de fractura s'ha utilitzat la màquina d'assajos dinamomètrica Sun 2500 de la marca Galdabini. Per tal de mesurar la deformació del material s'utilitza un videoextensòmetre.

Els assajos s'han dut a terme segons les condicions següents:

- Velocitat de desplaçament entre mordasses 1mm/min
- Cèl·lula de carga de 5kN.

S'utilitzarà una lupa binocular s'ha utilitzat per observar i mesurar amb el micròmetre les dimensions de la zona de la proveta que ha deformat plàsticament i la longitud de lligament real.

5.3.5.2. Preparació de les provetes

Les provetes utilitzades son de geometria DDENT. A la figura 8 es mostra un croquis de la seva geometria. Aquest tipus de proveta presenta doble entalla situada al centre de la proveta. Aquesta geometria permet minimitzar la possible rotació de la proveta al anar propagant l'esquerda, fent que l'esforç sigui uniaxial durant tot l'assaig. La fractura anirà propagant pel lligament en la direcció de les entalles creant una zona amb deformació plàstica.

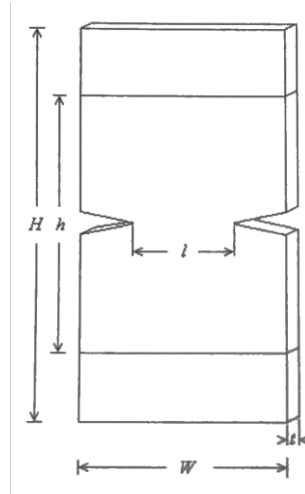


Figura 8: Esquema d'una proveta DDENT. Obtinguda de la font [14]

Les dimensions utilitzades en aquestes provetes són:

- $H = 105\text{mm}$
- $h = 65\text{mm}$
- $l = 6\text{mm}$ fins a 24mm en increments de 2mm
- $W = 65\text{mm}$
- t : varia en funció de cada proveta, per tal de que no afecti als resultats es calcularà la relació Força/espessor.

En l'anàlisi inicial per confirmar que es compleixen els requeriments per l'estudi de treball essencial de fractura s'han analitzat els materials Bioblend 0, 3 i 6.

S'han mecanitzat i entallat les provetes manualment, utilitzant tisores. Posteriorment s'han pintat totalment amb pintura opaca blanca en esprai i a posteriori s'ha fet pintar una capa de punts negres amb pintura opaca negra en esprai per tal de que es pugui analitzar la deformació en el lligament amb l'aparell Zwick/Roell Amsler HC25. Finalment s'han aguditzat just abans de ser assajades amb una fulla d'afaitar. Les mostres s'han fet amb les provetes amb una longitud de lligament de 16mm . S'han assajat un total de dos provetes per cada material, assegurant-se que hi ha hagut com a mínim un assaig vàlid per cada material.

Els materials assajats són el Bioblend 0 i el Bioblend 3. No s'ha assajat el Bioblend 6 degut a que aquesta tècnica és molt delicada i el film presentava irregularitats importants a la superfície que podrien dificultar el fet d'obtenir assajos vàlids. Per altra banda aquests assajos s'han dut a terme durant el mes de desembre, cosa que comporta que el temps restant del projecte vagi minvant. Les provetes s'han extret de la zona central dels films en direcció MD.

S'han mecanitzat i entallat manualment utilitzant tisores. Posteriorment s'han aguditzat amb una fulla d'afaitar abans d'assajar-les. Inicialment s'han assajat un total de 10 provetes de cada material, cadascuna amb una longitud de lligament diferent tal i com s'ha esmentat anteriorment en les dimensions de les provetes. Posteriorment s'han afegit quatre assajos més amb unes longituds de lligament de 8,12,16 i 20mm per a cada material. Per tal de poder mesurar les deformacions s'han dibuixat dues línies perpendiculars a l'aplicació de la força al centre de la proveta amb un marcador indeleble. Aquestes línies tenen una separació igual a la longitud de lligament de la proveta.

5.3.5.3. Càlculs realitzats

En aquesta tècnica cal W_f

Al tenir W_f conegut es sap que aquest es pot separar en dos tipus de treball: W_e que correspon al treball absorbit a la zona de la fractura i W_p que és el treball absorbit en la zona on hi ha hagut una deformació plàstica.

$$W_f = W_e + W_p$$

Com que W_e és l'energia que es necessita per a fracturar la proveta es sap que aquesta ha de ser depèn de la longitud del lligament i el gruix.

$$W_e = lt \cdot w_e$$

Com que W_p és l'energia necessària per deformar la zona propera al lligament es pot associar a l'àrea deformada de la proveta i el gruix.

$$W_p = l^2 t \cdot w_p$$

Com que la forma de la zona deformada plàsticament Per tal de relacionar la longitud de lligament amb l'àrea deformada té una forma d'ull s'utilitza un factor de forma β donat per la següent expressió [13].

$$\beta = \frac{h}{kl}$$

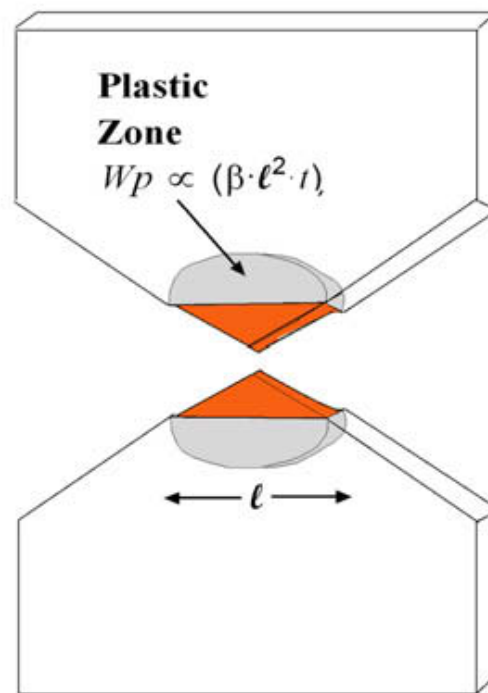


Figura 9: Esquema d'una proveta de treball essencial de fractura assajada mostrant la zona de deformació plàstica. Extret de la font [13].

On h és l'alçada màxima, l la longitud de lligament i k és un factor de forma amb $k=1,5$.

D'aquesta forma ja podem posar W_f en funció de paràmetres coneguts, de tal manera que ens queda la següent expressió:

$$W_p = \beta \cdot l^2 t \cdot w_p$$

Resultant en:

$$\frac{W_f}{lt} = w_f = w_e + \beta w_p \cdot l$$

Per tal de conèixer w_e es fan diferents assajos amb una longitud de lligament diferent i es calcula la línia de tendència amb els eixos w_f i l , sent w_e el treball que correspon quan la longitud de lligament és zero.

Si es desitja també es pot calcular w_p coneixent les dimensions de l'àrea deformada plàsticament, w_f i w_e .

6. Resultats i discussions

6.1. Plaques

6.1.1. Assaig de mecànica de la fractura

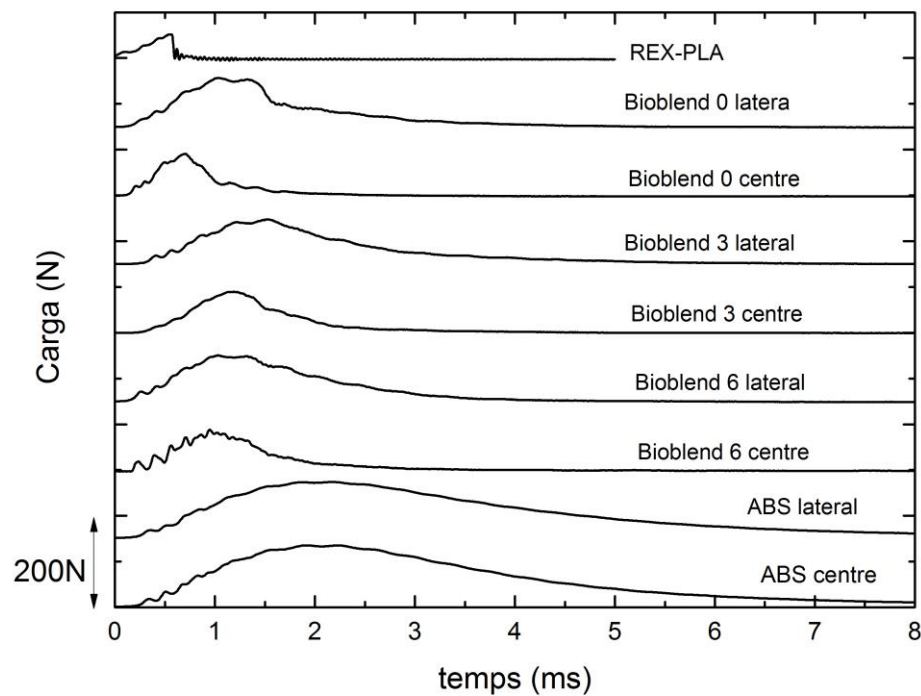


Figura 10: Registres Carga-temps típics de les diferents composicions estudiades

Es pot veure com les corbes Carga-temps el REX-PLA presenta una corba elàstica-lineal. En el cas dels copolímers i l'ABS hi ha un comportament elàstica-lineal amb esquinçament. Cal destacar que com a major %d'ABS-g-MAG té el copolímer l'energia de propagació final en la corba és major. Això assenyala a que el material

6.1.1.1. Resistència a impacte

Taula 2: Resultats dels càlculs de resistència a l'impacte

Material	REX-PLA	Bioblend-0	Bioblend-0	Bioblend-3	Bioblend-3
Situació	-	Lateral	Centre	Lateral	Centre
Resistència a l'impacte (kJ/m ²)	1 ±0,2	7 ±1	6 ±1	7 ±0,8	6 ±0,5

Material	Bioblend-6	Bioblend-6	ABS	ABS
Situació	Lateral	Centre	Lateral	Centre
Resistència a l'impacte (kJ/m ²)	7 ±1	6 ±0,9	20 ±3	20 ±3

6.1.1.2. K_{IC}

Taula 3: Resultats dels càlculs de K_{IC}

Material	REX-PLA	Bioblend-0	Bioblend-0	Bioblend-3	Bioblend-3
Situació	-	Lateral	Centre	Lateral	Centre
K _{IC} MPa·m ^{0,5}	1,99 ±0,04	3,21 ±0,06	3,16 ±0,04	3,09 ±0,4	3,12 ±0,4

Material	Bioblend-6	Bioblend-6	ABS	ABS
Situació	Lateral	Centre	Lateral	Centre
K _{IC} MPa·m ^{0,5}	3,02 ±0,03	3,12 ±0,05	5 ±1	4 ±0,4

6.1.1.3. G_c

Taula 4: Resultats dels càlculs de G_c

Material	REX-PLA	Bioblend-0	Bioblend-0	Bioblend-3	Bioblend-3
Situació	-	Lateral	Centre	Lateral	Centre
G_c kJ/m ²	450 ±40	1300 ±150	1200 ±60	1300 ±200	1100 ±50

Material	Bioblend-6	Bioblend-6	ABS	ABS
Situació	Lateral	Centre	Lateral	Centre
G_c kJ/m ²	1200 ±90	1200 ±140	3500 ±700	3000 ±500

6.1.1.4. Micrografies de la superfície de fractura

En el cas de les micrografies Per tal de poder tenir una imatge de tota la superfície de fractura s'han fet 6 fotografies diferents que a posteriori s'han utilitzat per compondre la imatge de tota la superfície. Les fotografies compostes estan en un augment de x50.

Es pot comprovar com en el cas de la proveta de REX-PLA hi ha hagut una ruptura fràgil. Al afegir la fase d'ABS com en el cas dels Bioblends la superfície de fractura té una geometria de ruptura dúctil. També es pot comprovar que a major quantitat d'ABS-g-MAH la superfície de fractura hi ha una deformació més pronunciada mentre que al mateix moment es pot veure com el domini de la fase d'ABS es redueix, fent-se més difícil de distingir les intercares del material. Aquest fet ens permet reconèixer que hi ha una millor compatibilitat de fases.

6.1.1.4.1 Superfície de fractura de REX-PLA

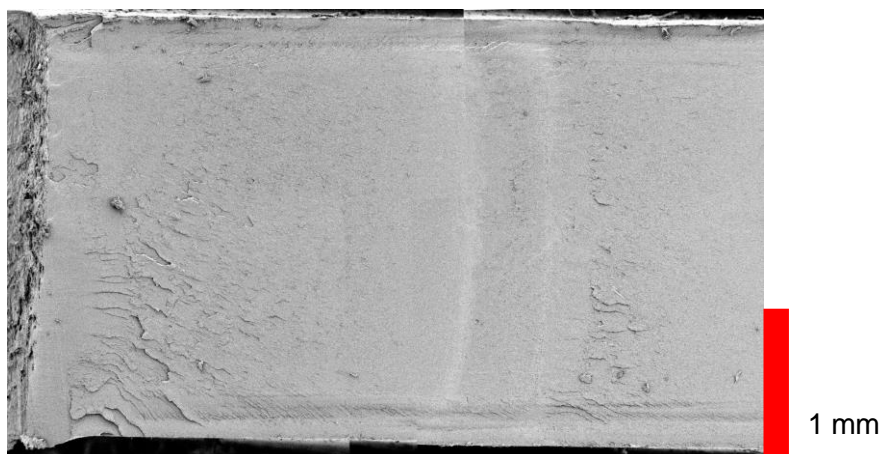


Figura 11: Imatge composta de la superfície de fractura de REX-PLA

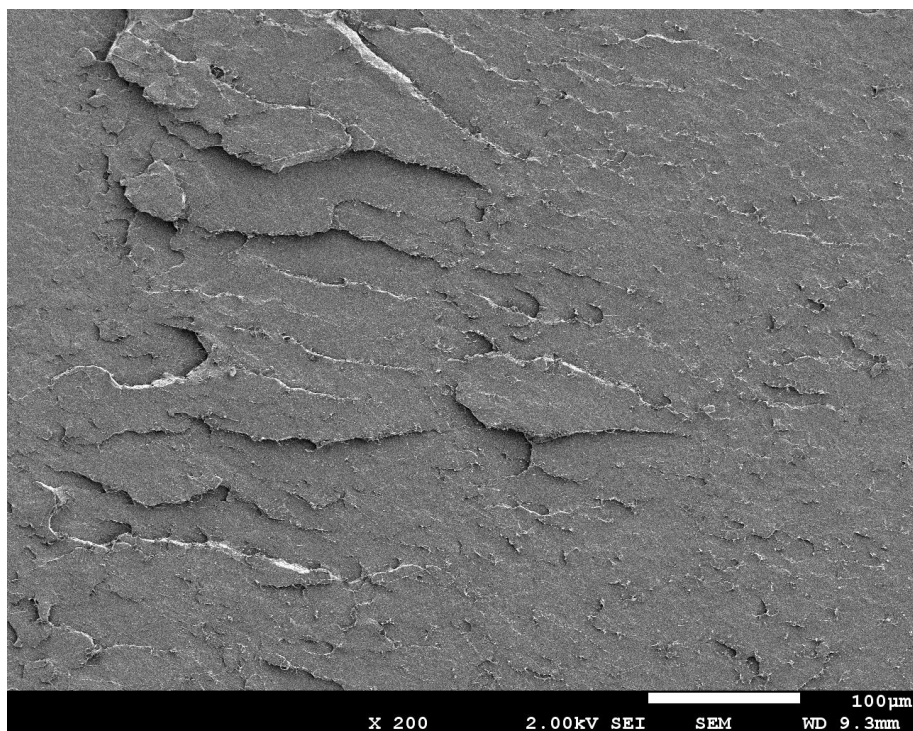


Figura 12: Micrografia de la superfície de fractura de REX-PLA en un assaig d'impacte pendular. Augment de x200

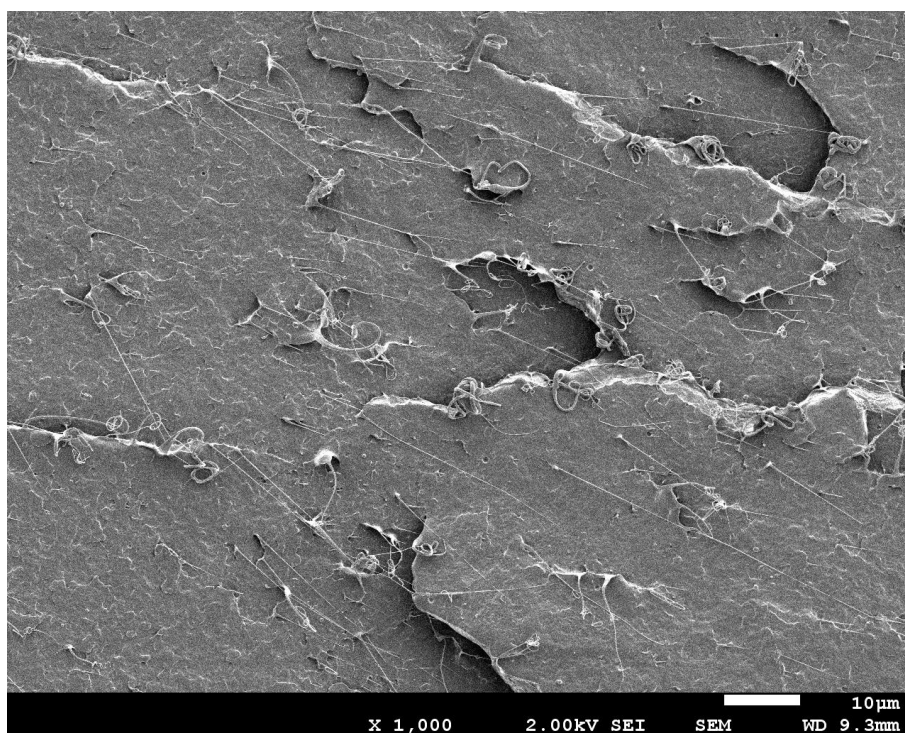


Figura 13: Micrografia de la superfície de fractura de REX-PLA en un assaig d'impacte pendular. Augment de x1000

6.1.1.4.2 Superfície de fractura de Bioblend 0 zona lateral

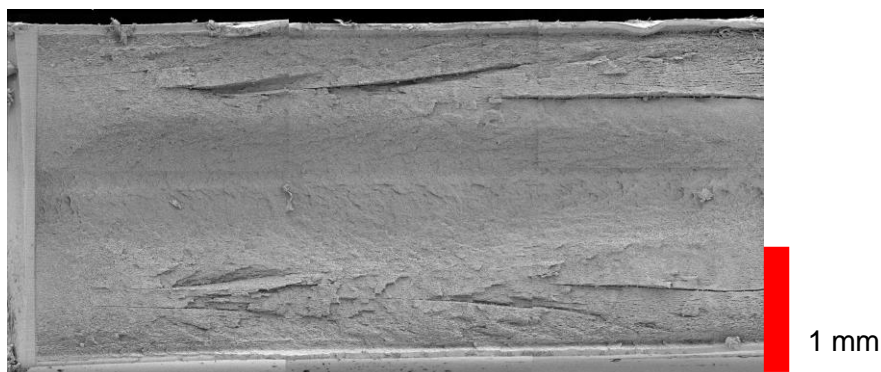


Figura 14: Imatge composta de la superfície de fractura de Bioblend 0 zona lateral

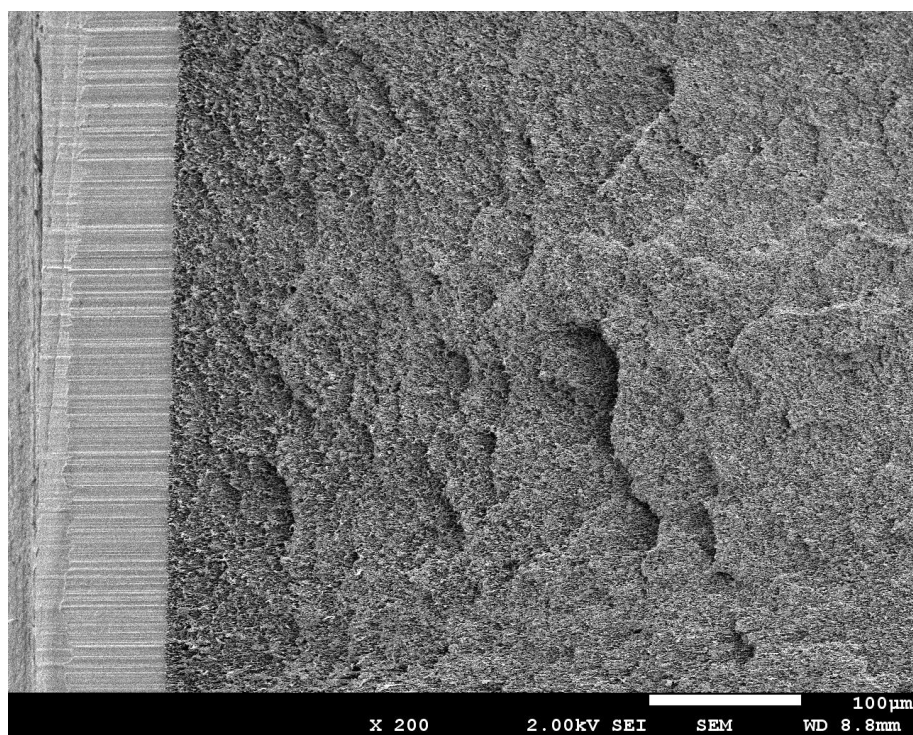


Figura 15: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 0 zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x200

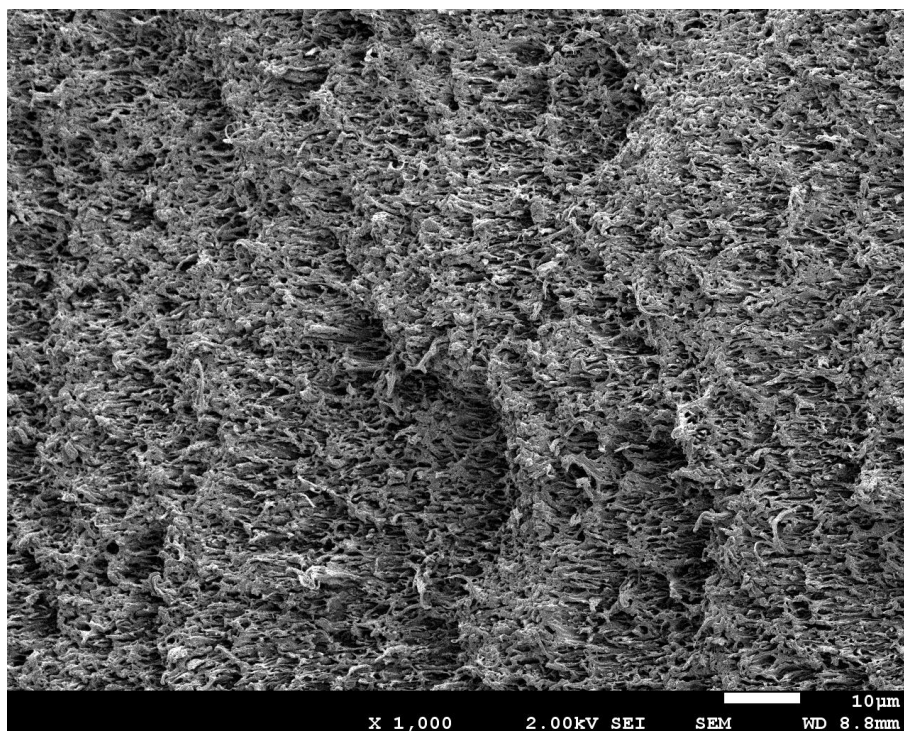


Figura 16: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 0 zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x1000

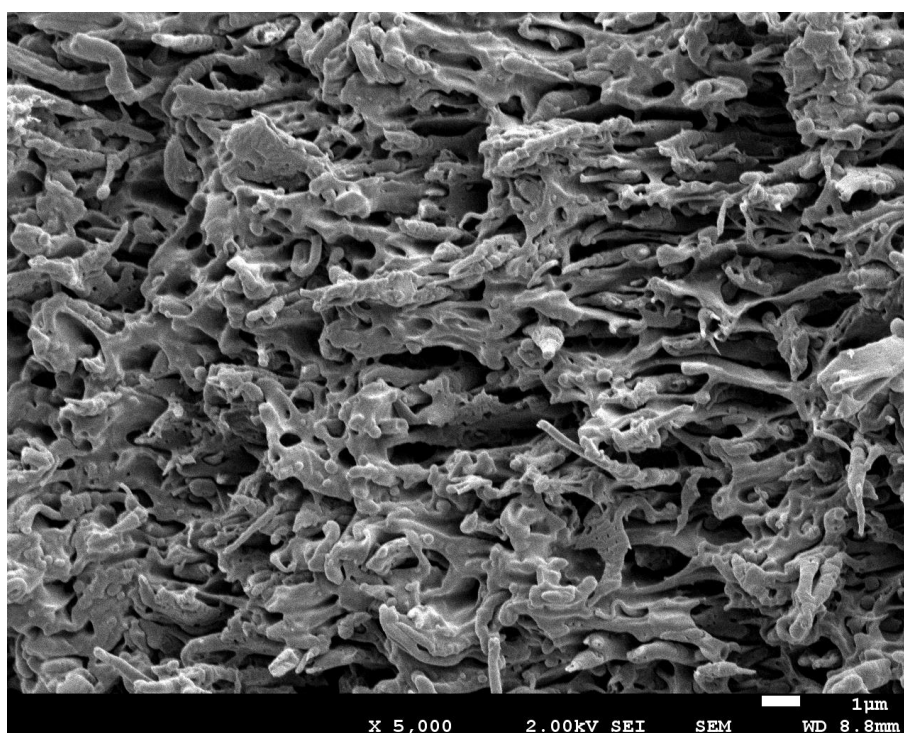


Figura 17: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 0 zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x5000

6.1.1.4.3 Superfície de fractura de Bioblend 0 zona central

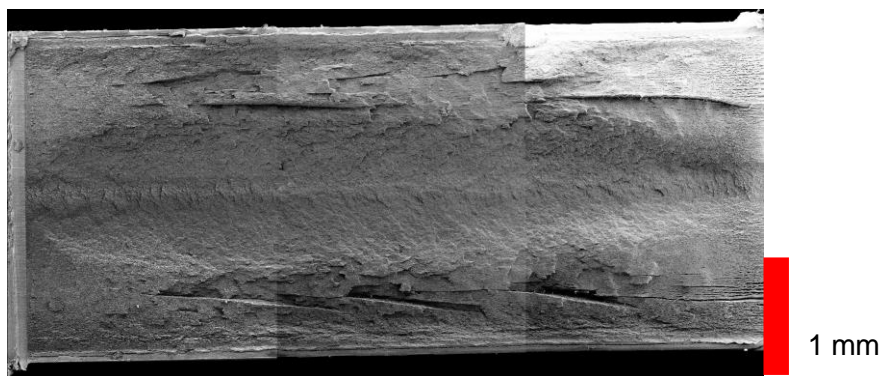


Figura 18: Imatge composta de la superfície de fractura de Bioblend 0 zona central

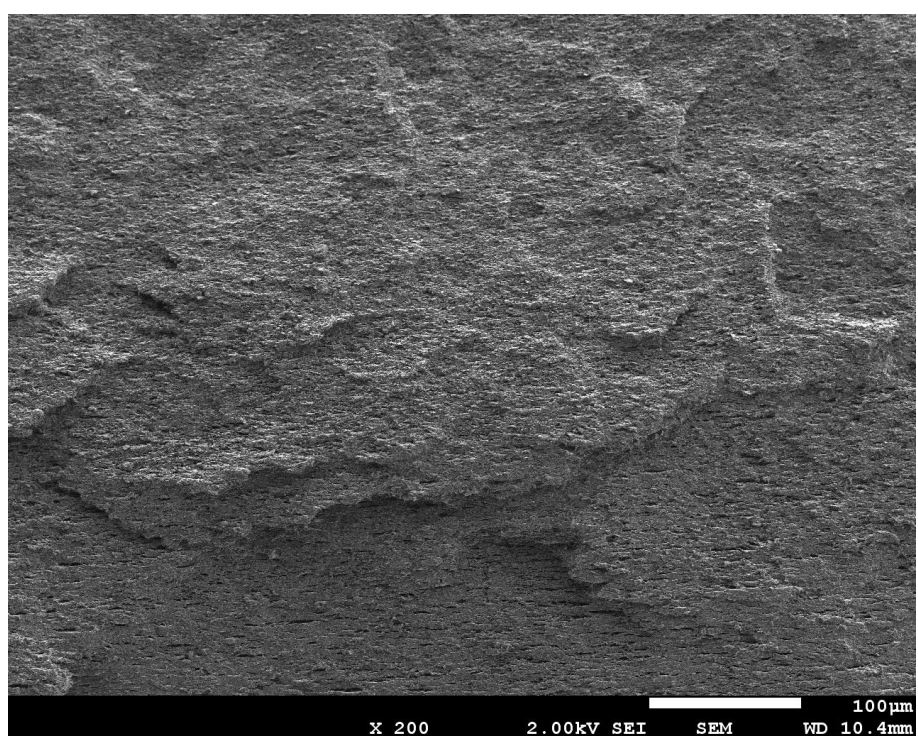


Figura 19: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 0 zona central en un assaig d'impacte pendular. Augment de x200

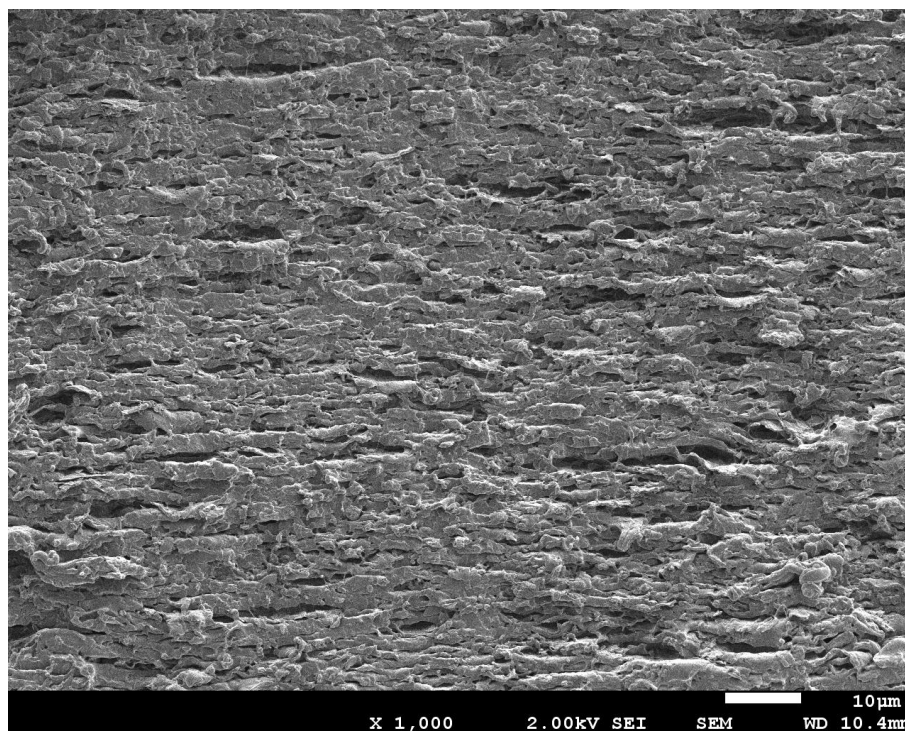


Figura 20: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 0 en zona central en un assaig d'impacte pendular. Augment de x1000

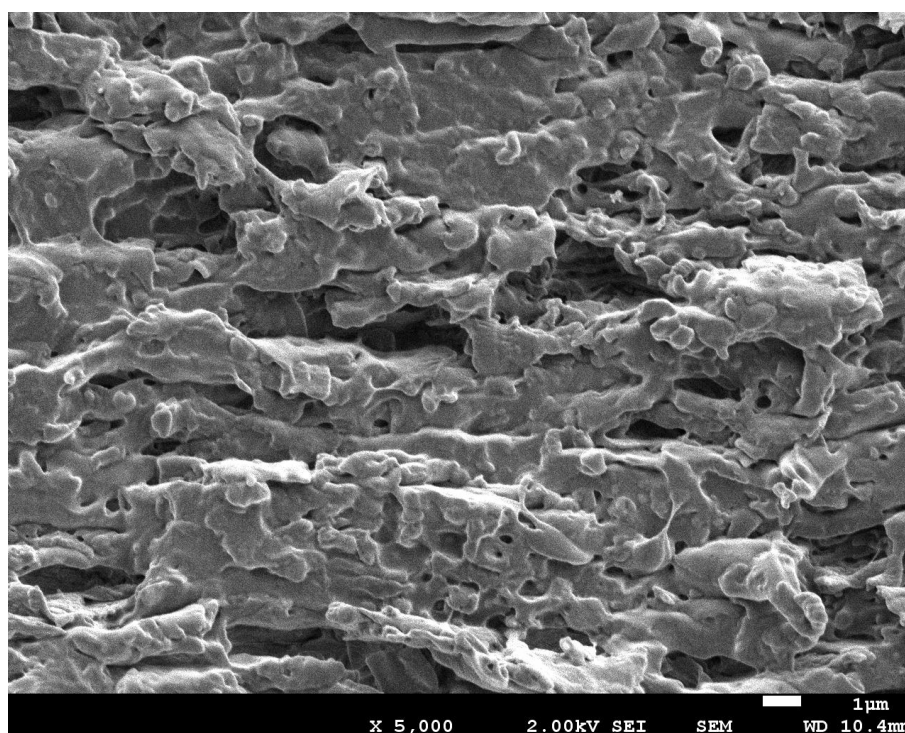


Figura 21: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 0 en zona central en un assaig d'impacte pendular. Augment de x5000

6.1.1.4.4 Superfície de fractura de Bioblend 3 zona lateral

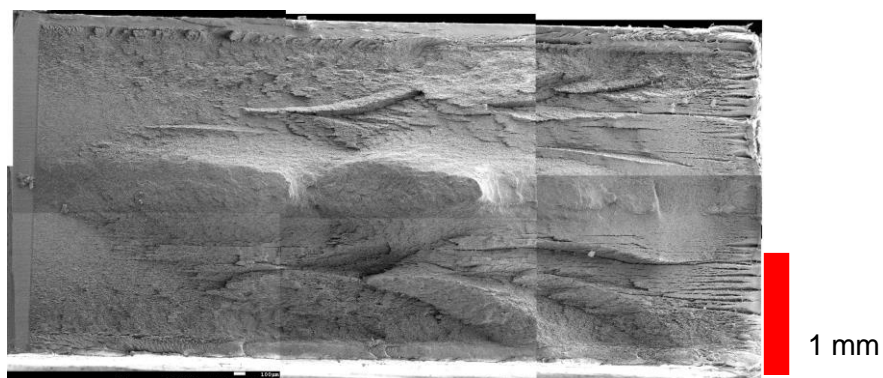


Figura 22: Imatge composta de la superfície de fractura de Bioblend 3 zona lateral

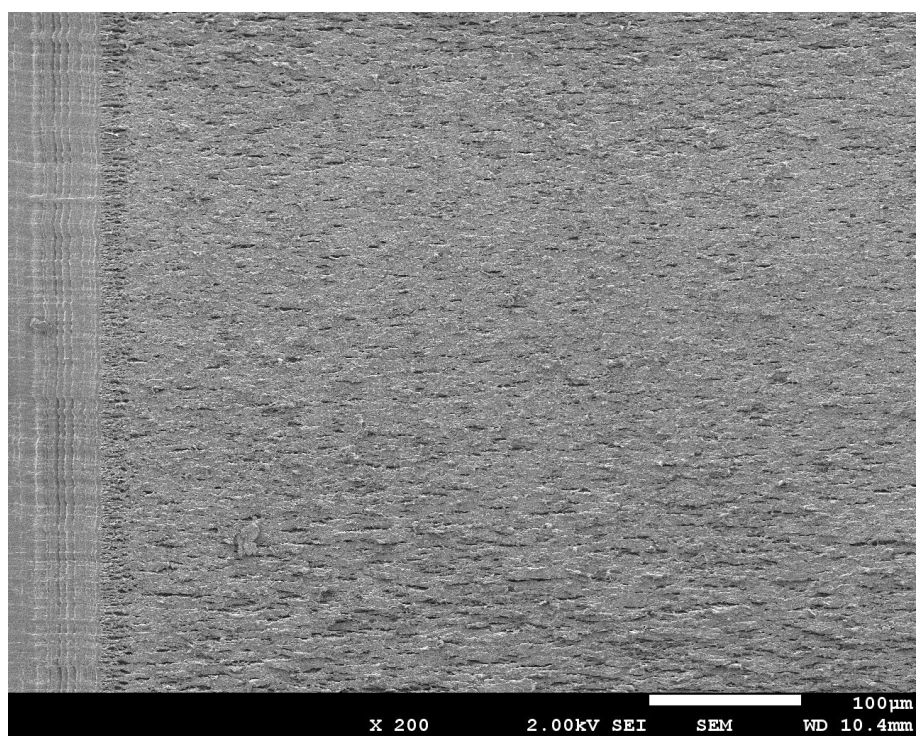


Figura 23: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 3 zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x200

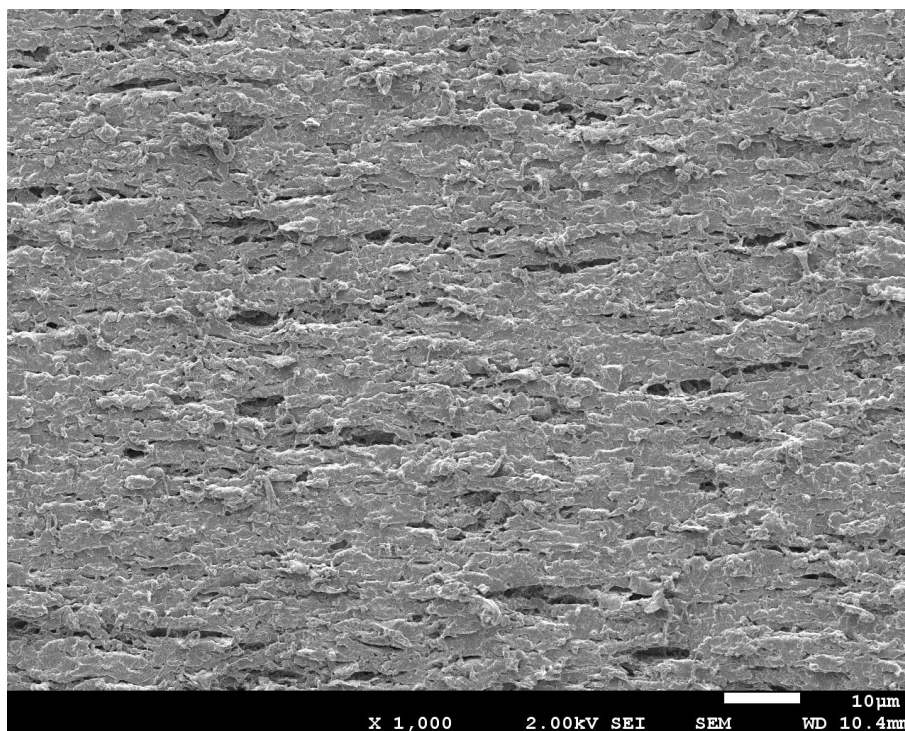


Figura 24: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 3 zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x1000

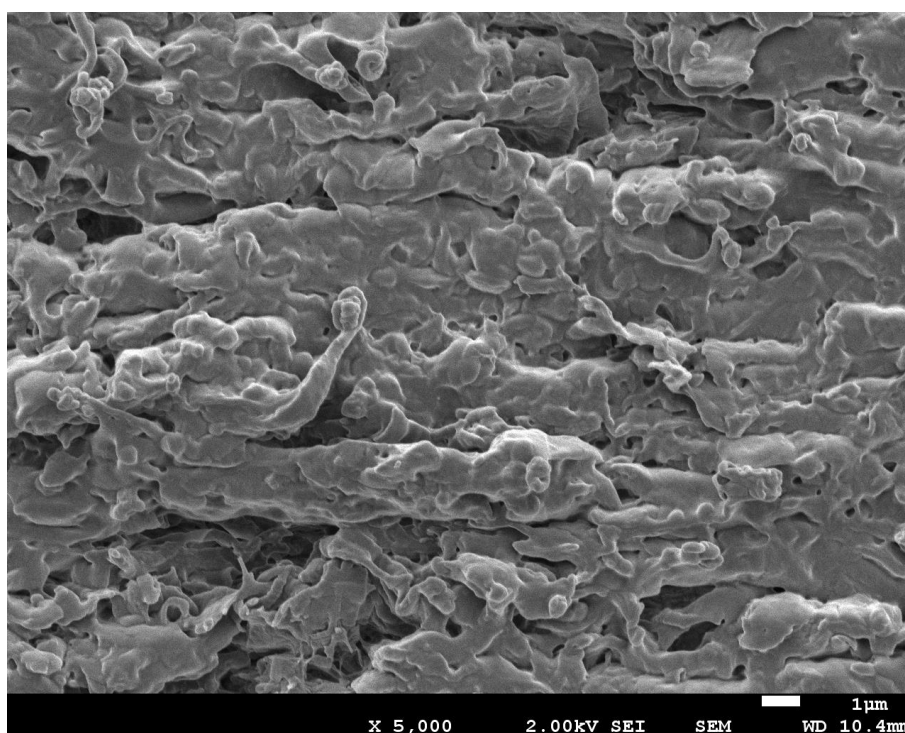


Figura 25: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 3 zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x5000

6.1.1.4.5 Superfície de fractura de Bioblend 3 zona central



Figura 26: Imatge composta de la superfície de fractura de Bioblend 3 zona central

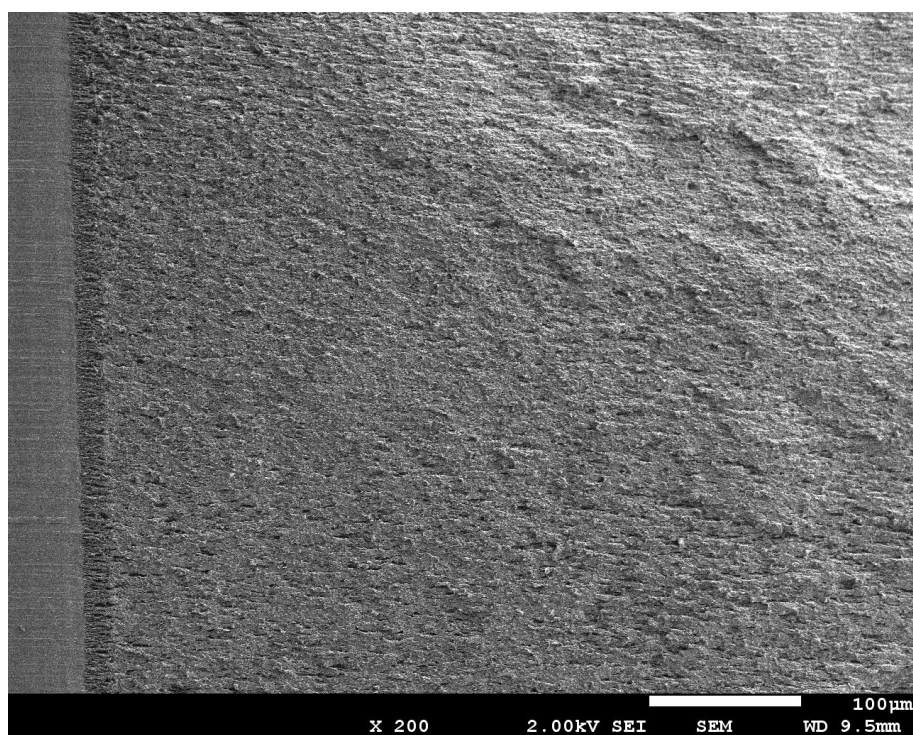


Figura 27: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 3 zona central en un assaig d'impacte pendular. Augment de x200

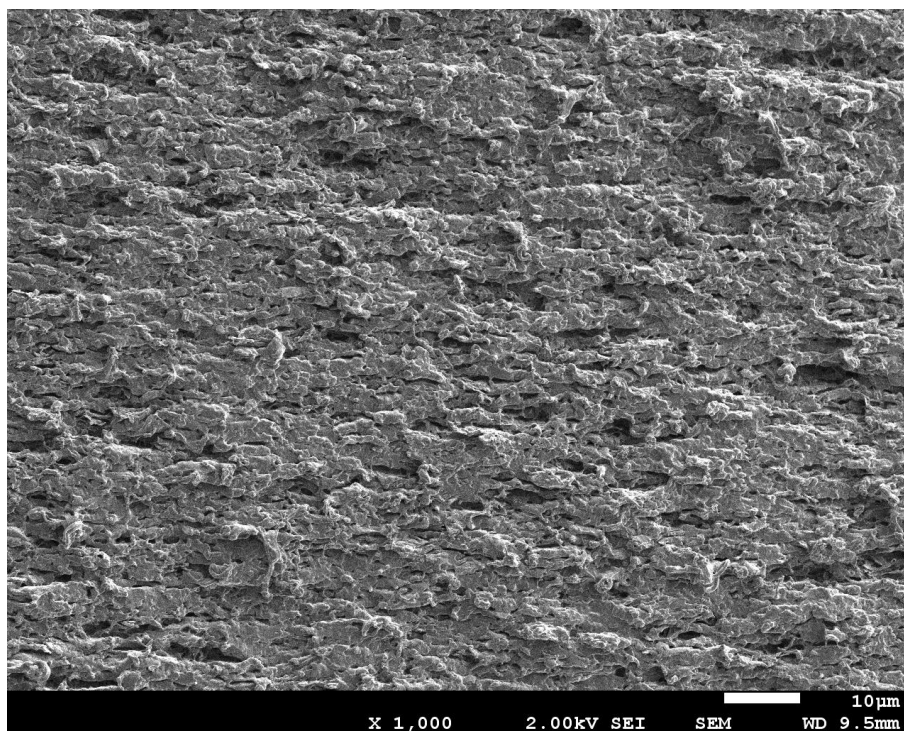


Figura 28: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 3 zona central en un assaig d'impacte pendular. Augment de x1000

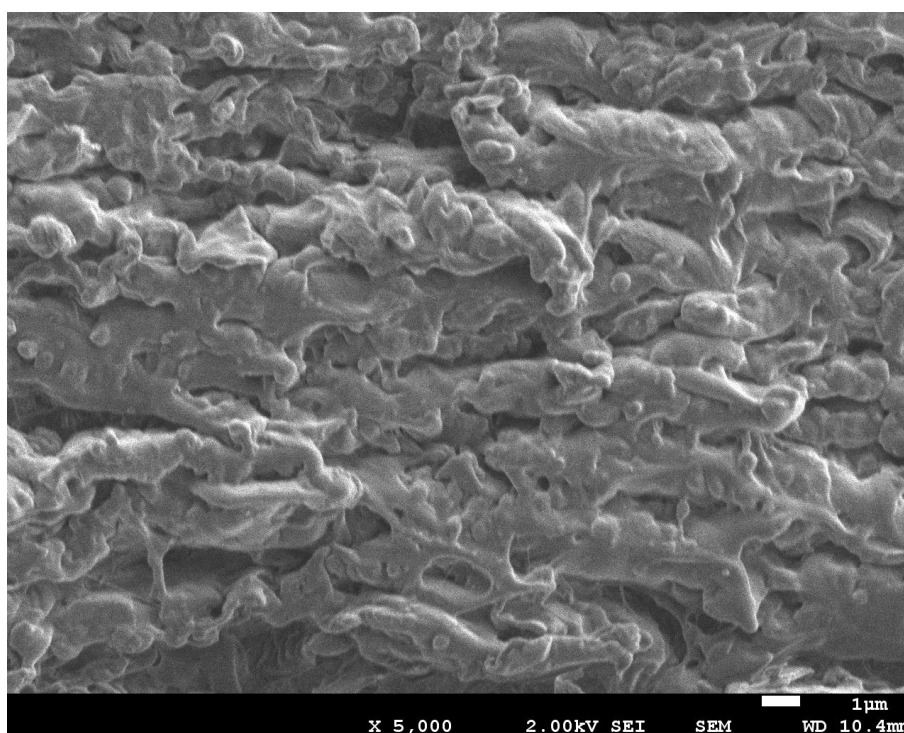


Figura 29: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 3 zona central en un assaig d'impacte pendular. Augment de x5000

6.1.1.4.6 Superfície de fractura de Bioblend 6 zona lateral

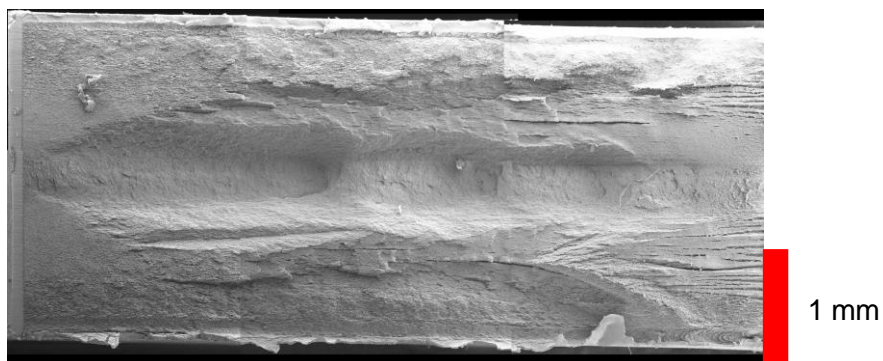


Figura 30: Imatge composta de la superfície de fractura de Bioblend 6 zona lateral

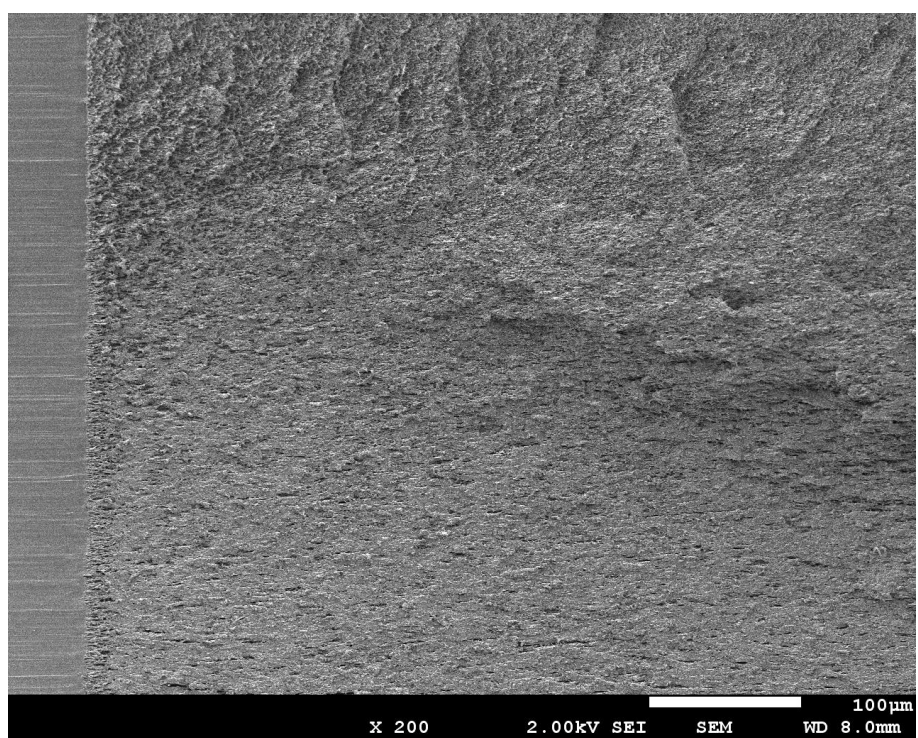


Figura 31: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 6 zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x200

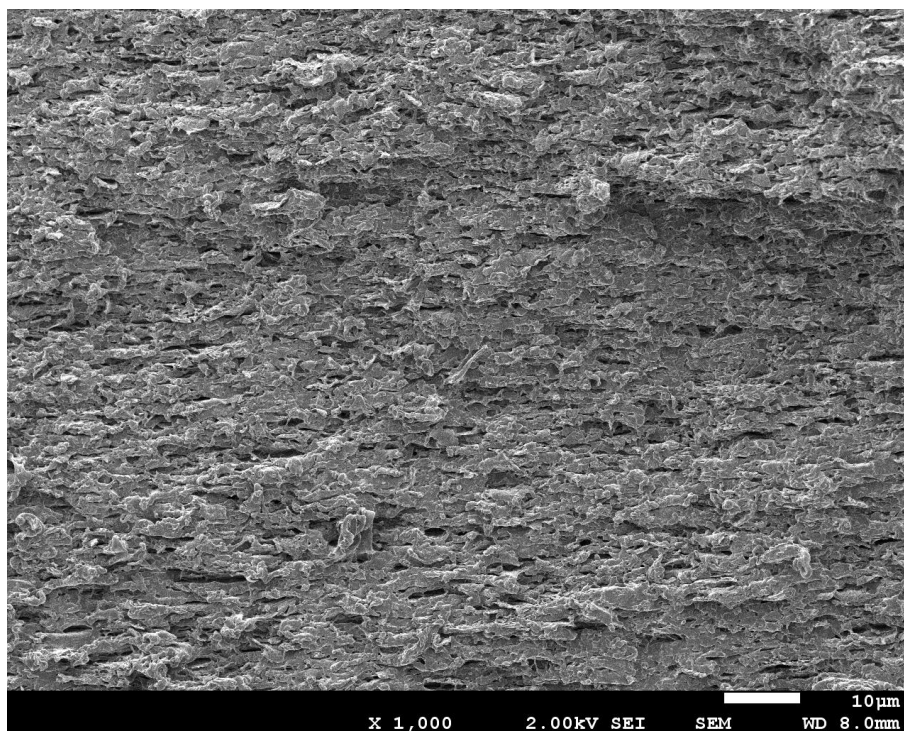


Figura 32: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 6 zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x1000

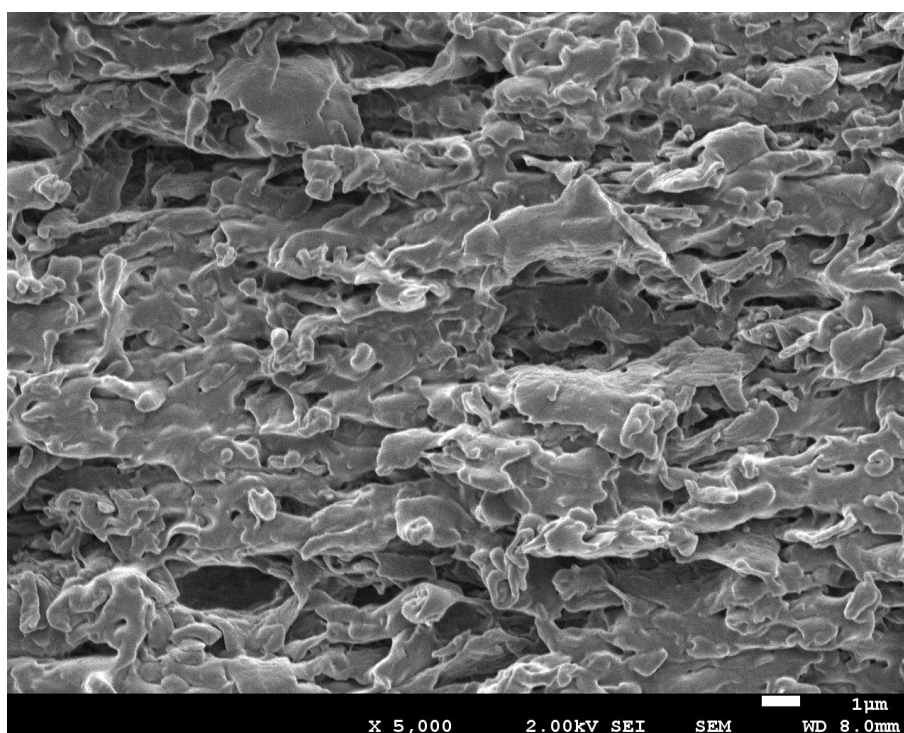


Figura 33: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 6 zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x5000

6.1.1.4.7 Superfície de fractura de Bioblend 6 zona central

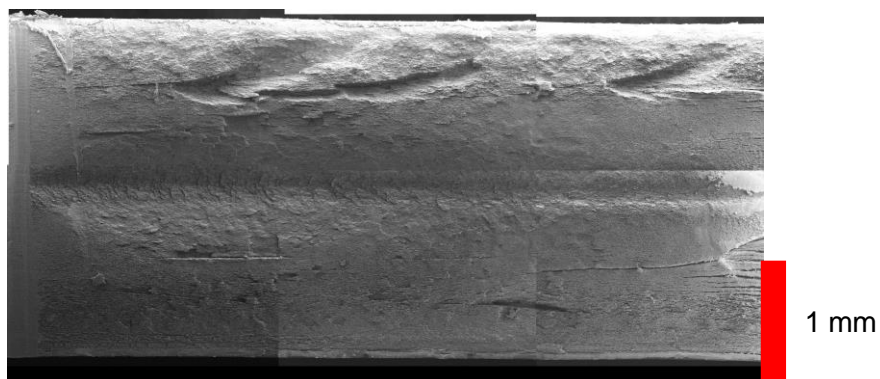


Figura 34: Imatge composta de la superfície de fractura de Bioblend 6 zona central

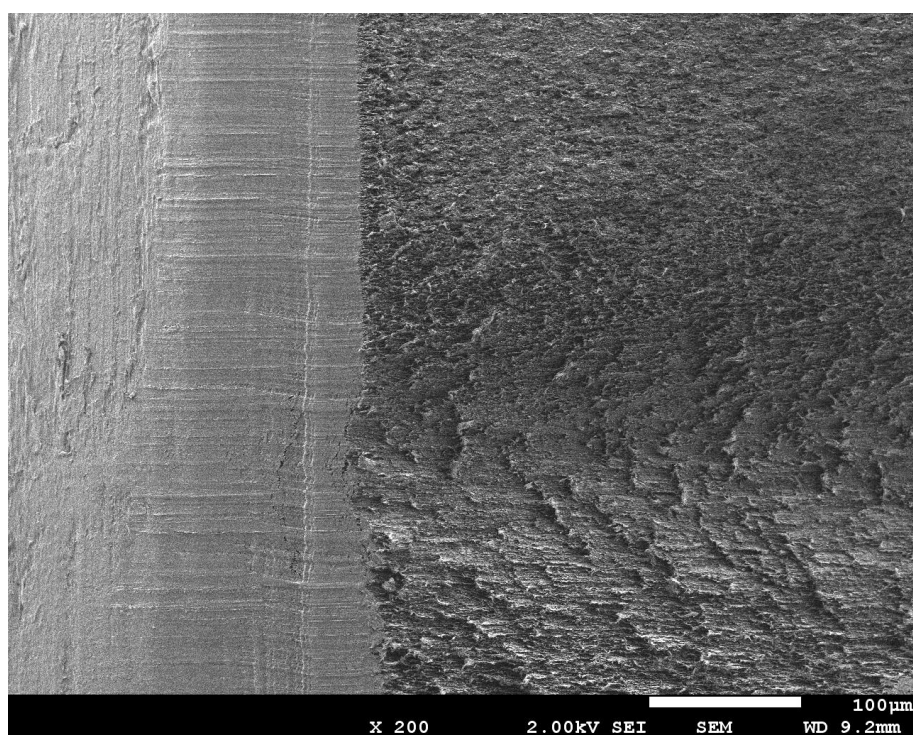


Figura 35: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 6 zona central en un assaig d'impacte pendular. Augment de x200

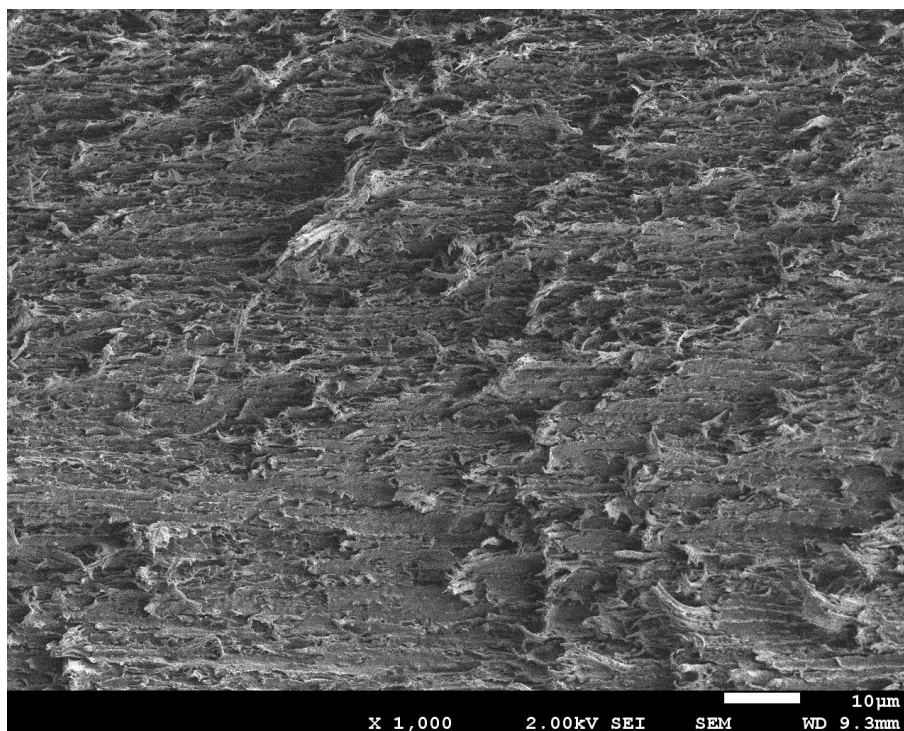


Figura 36: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 6 zona central en un assaig d'impacte pendular. Augment de x1000

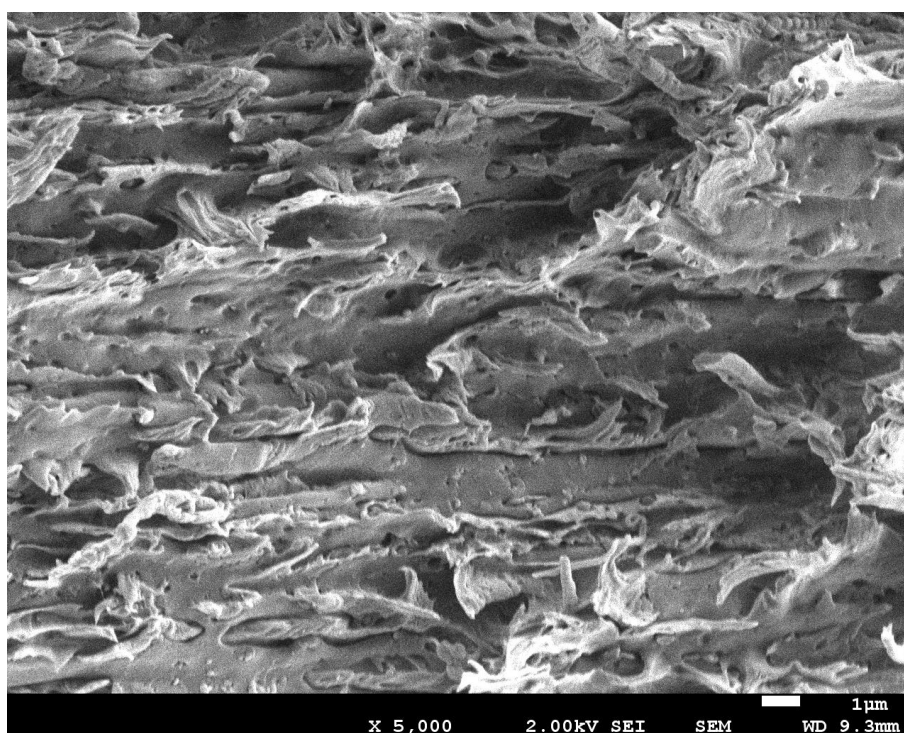


Figura 37: Micrografia de la superfície de fractura de Bioblend 6 zona central en un assaig d'impacte pendular. Augment de x5000

6.1.1.4.8 Superfície de fractura d'ABS zona central

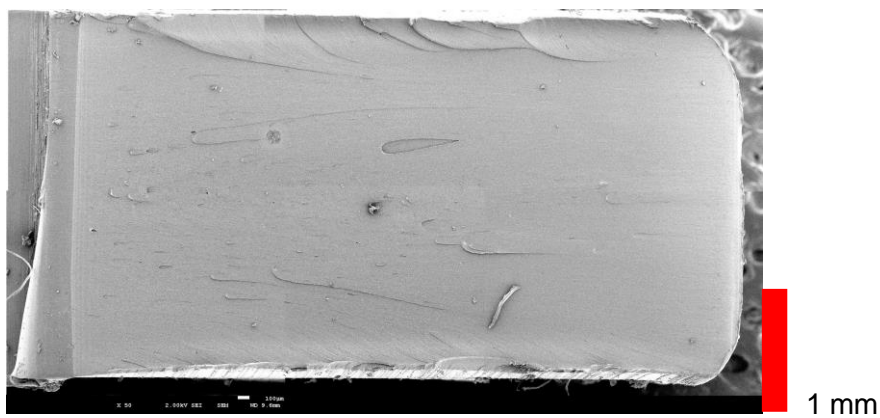


Figura 38: Imatge composta de la superfície de fractura de la mostra de ABS central

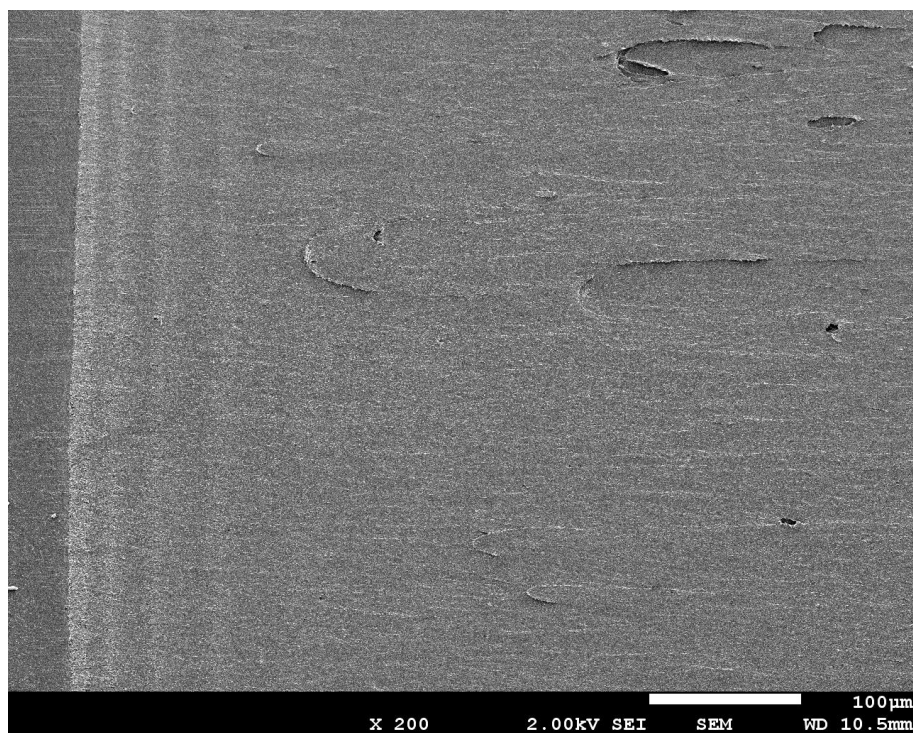


Figura 39: Micrografia de la superfície de fractura d'ABS zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x200

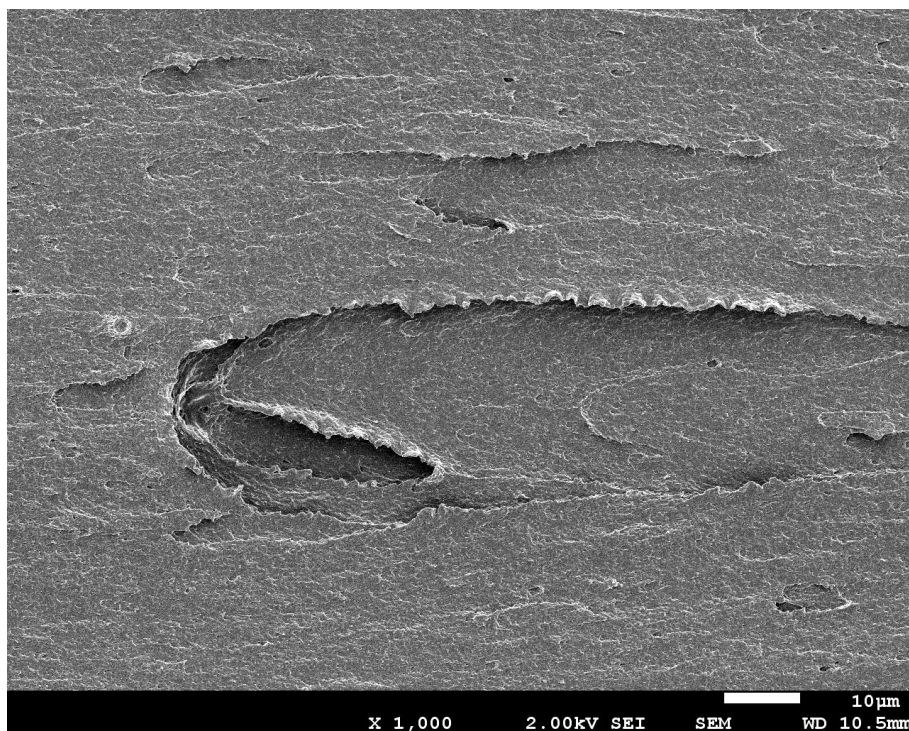


Figura 40: Micrografia de la superfície de fractura d'ABS zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x1000

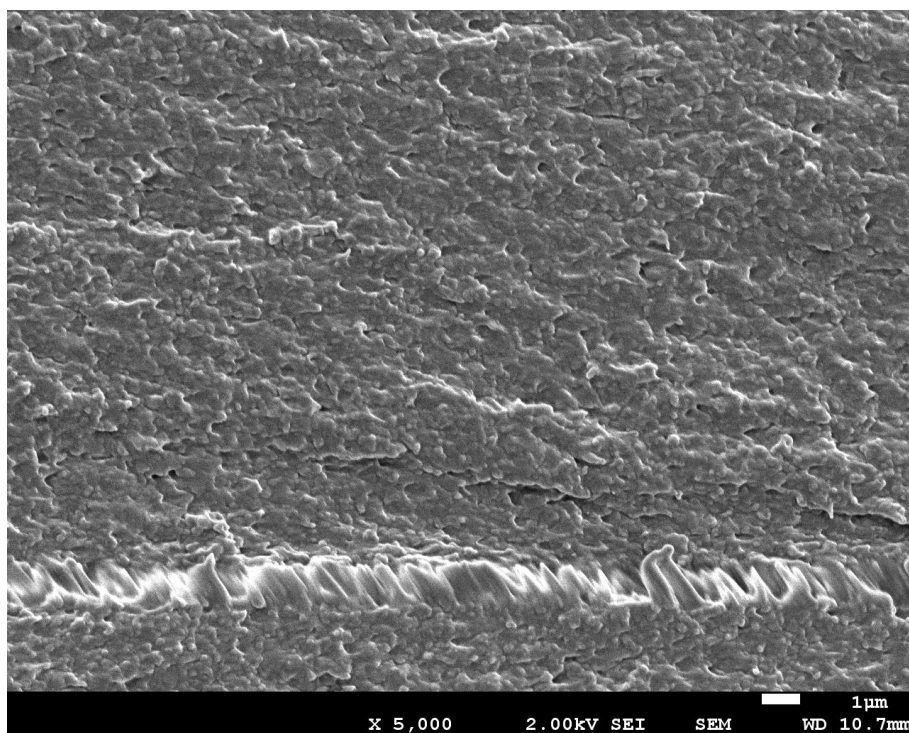


Figura 41: Micrografia de la superfície de fractura d'ABS zona lateral en un assaig d'impacte pendular. Augment de x5000

6.1.2. Morfologia: Microscòpia SEM

En les següents micrografies es pot comprovar com a major contingut de ABS-g-MAH es genera efecte més emulsificant, és a dir que es redueix la mida de fase discreta d'ABS dins de la matriu de PLA. Aquest fet demostra que l'anhidrid maleic es comporta com a agent compatibilitzador de les fases de PLA i ABS.

Per altra banda també es pot destacar que les plaques tenen una estructura laminar sent l'eix de major orientació en direcció transversal al flux. Aquesta orientació pot ser deguda a la orientació donada pel flux en el moment en el que el material és injectat.

6.1.2.1. Bioblend 0 observació MD

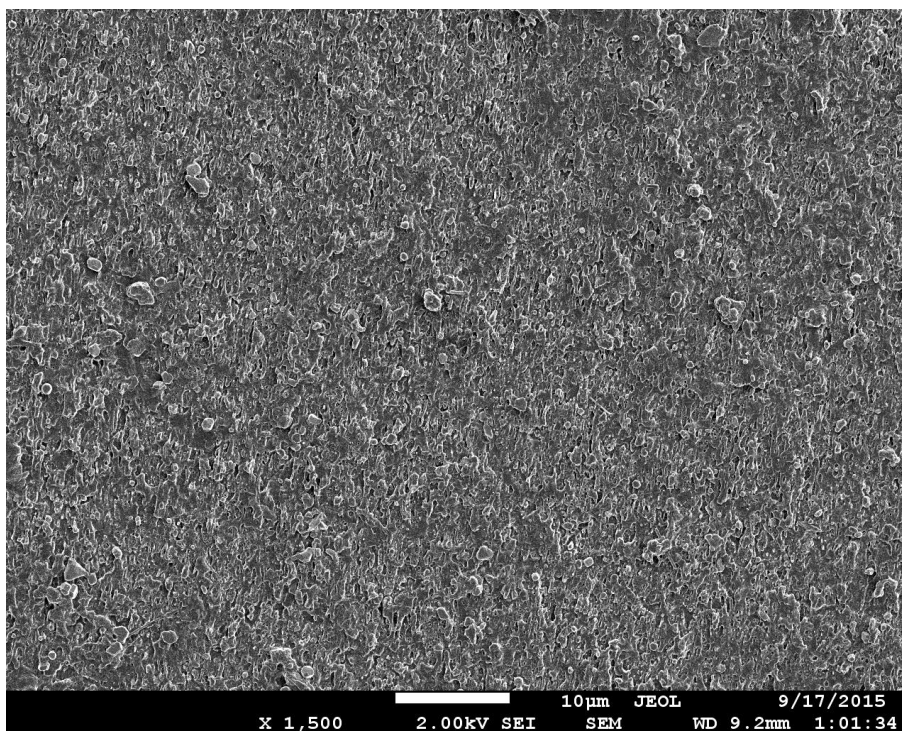


Figura 42: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 0. Mostra tallada en direcció TD, mostrant la direcció MD en un punt mig respecte el punt d'injecció. Mostra recoberta de tàntal. x1500 augments

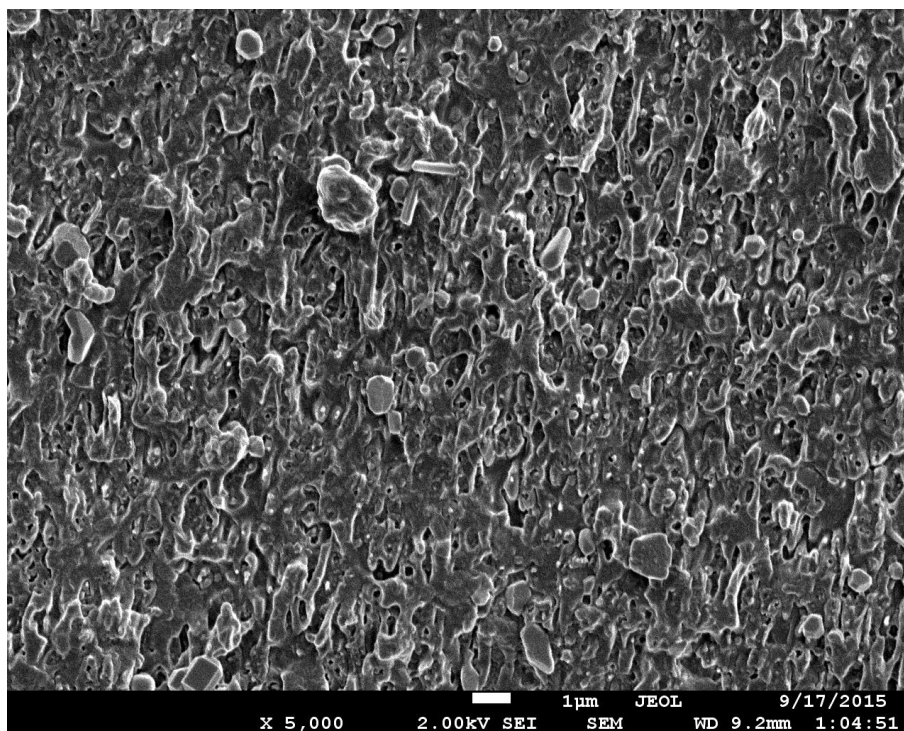


Figura 43: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 0. Mostra tallada en direcció TD, mostrant la direcció MD en un punt mig respecte el punt d'injecció. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments

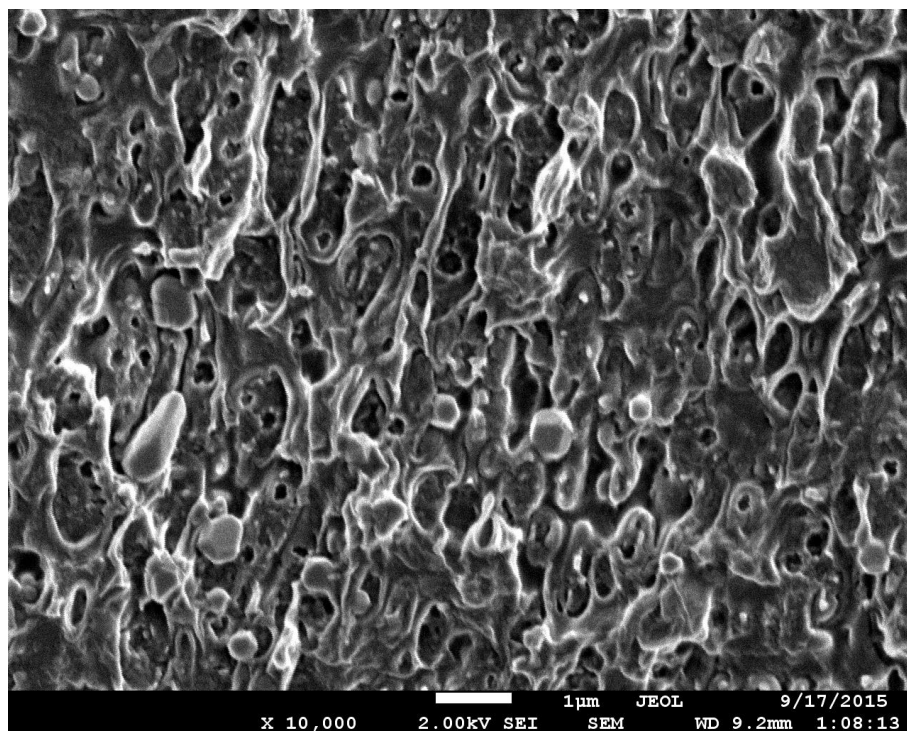


Figura 44: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 0. Mostra tallada en direcció TD, mostrant la direcció MD en un punt mig respecte el punt d'injecció. Mostra recoberta de tàntal. x10000 augments

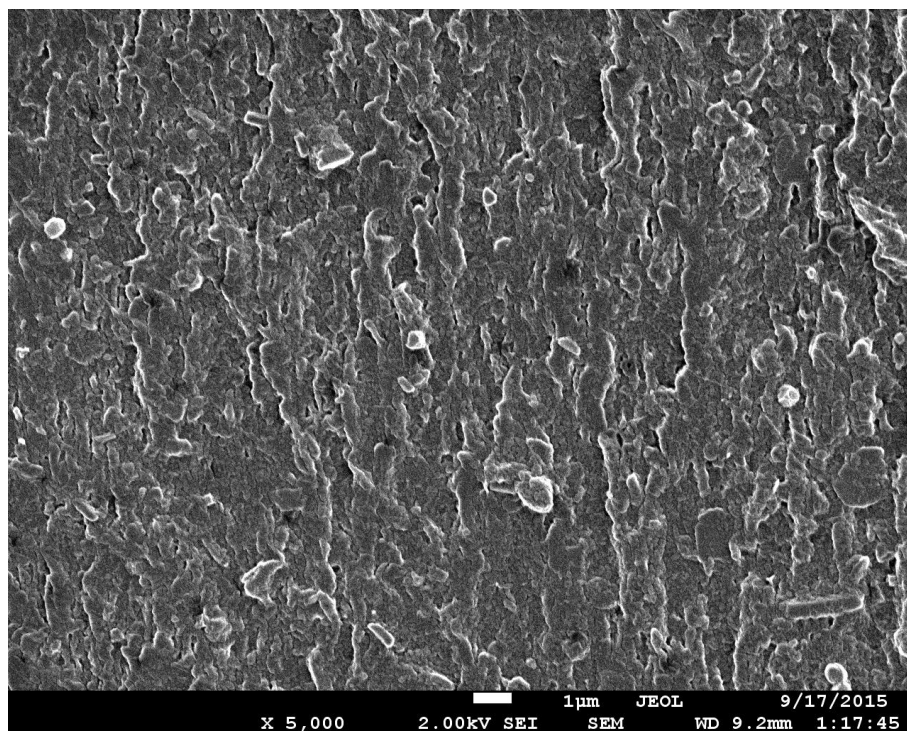


Figura 45: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 0. Mostra tallada en direcció

TD, mostrant la direcció MD en un punt mig respecte el punt d'injecció, proper a la superfície de la placa. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments.

6.1.2.2. Bioblend 0 observació TD

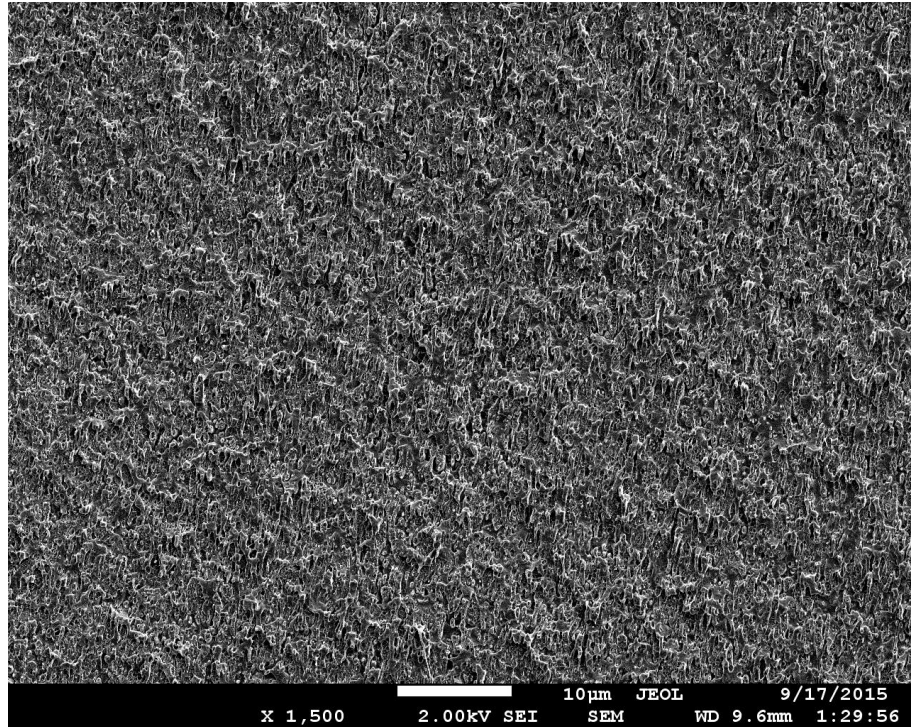


Figura 46: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 0. Mostra tallada en direcció MD, mostrant la direcció TD en la zona central. Mostra recoberta de tàntal. x1500 augments

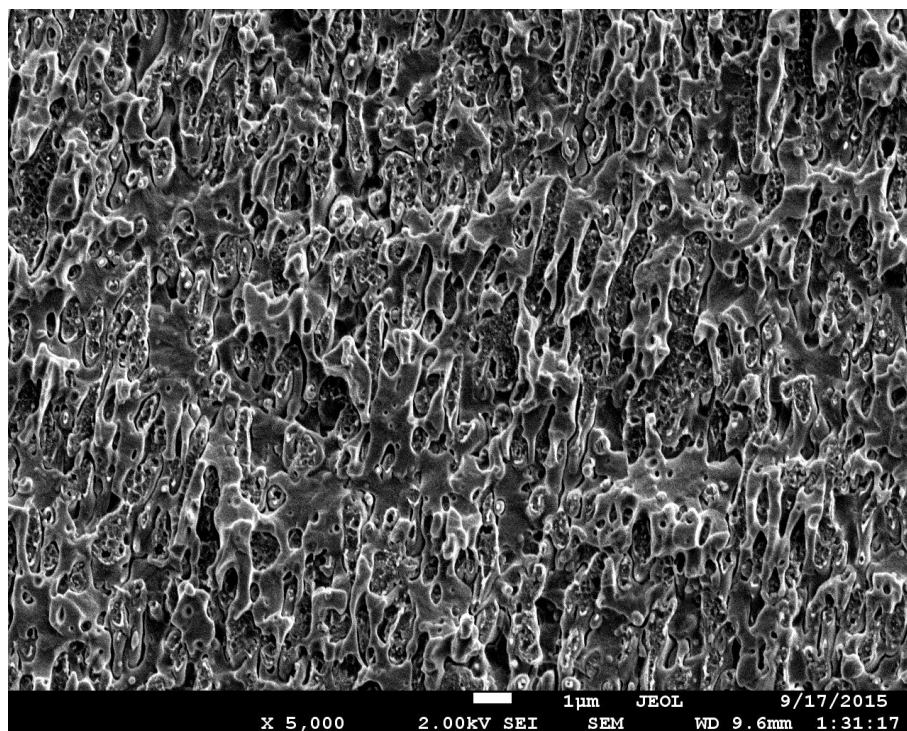


Figura 47: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 0. Mostra tallada en direcció MD, mostrant la direcció TD en la zona central. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments

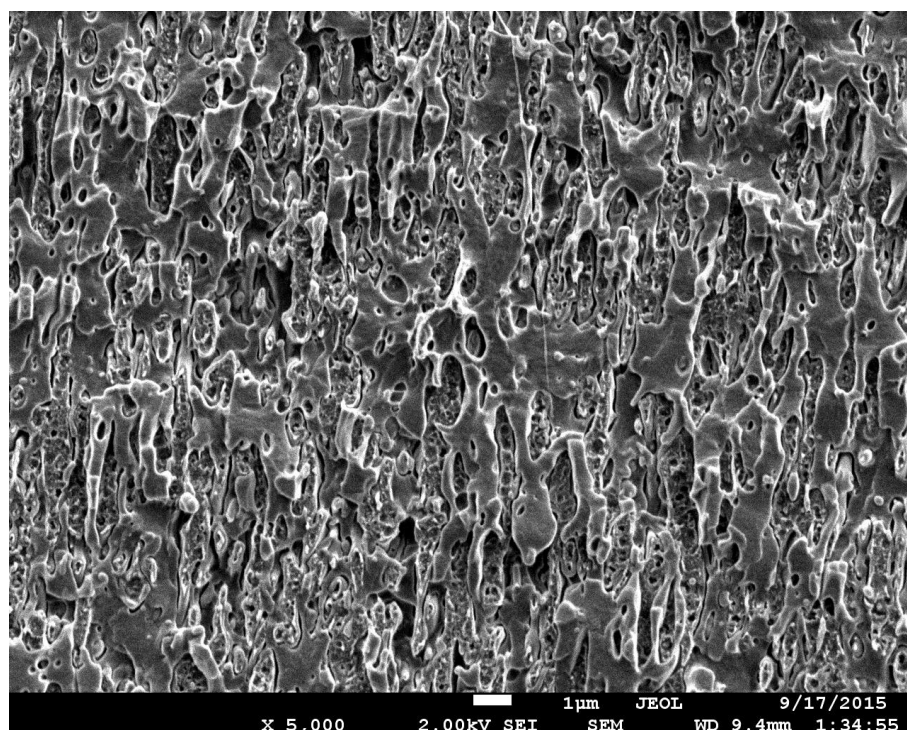


Figura 48: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 0. Mostra tallada en direcció MD, mostrant la direcció TD en la zona central, més propera a la superfície de la

placa. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments

6.1.2.3. Bioblend 6 observació MD

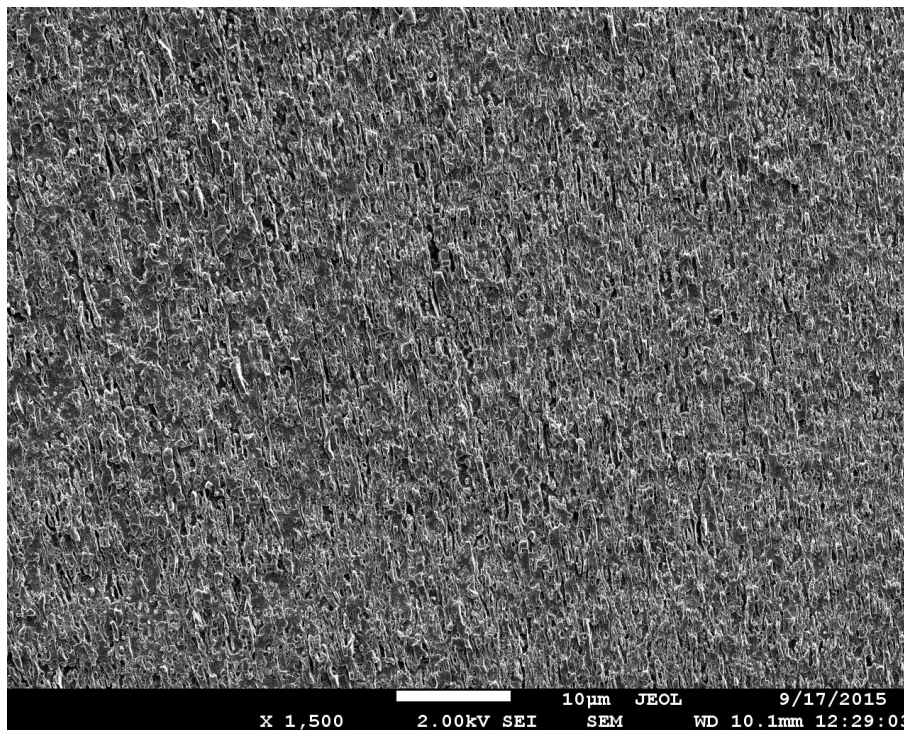


Figura 49: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 6. Mostra tallada en direcció TD, mostrant la direcció MD en un punt mig respecte el punt d'injecció. Mostra recoberta de tàntal. x1500 augments

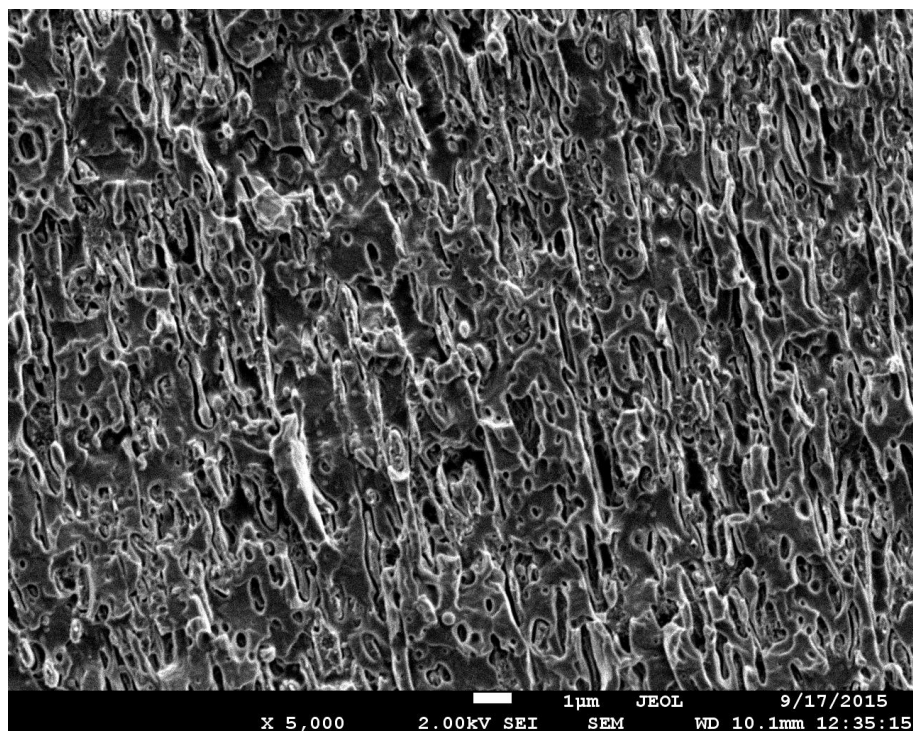


Figura 50: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 6. Mostra tallada en direcció TD, mostrant la direcció MD en un punt mig respecte el punt d'injecció. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments

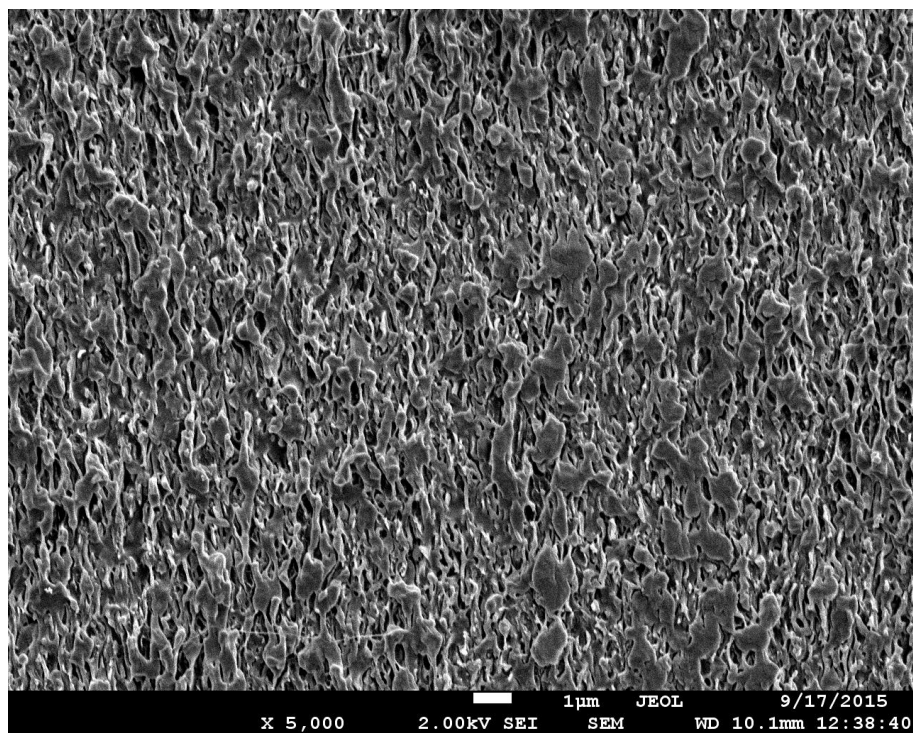


Figura 51: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 6. Mostra tallada en direcció

TD, mostrant la direcció MD en un punt mig respecte el punt d'injecció, proper a la superfície de la placa. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments.

6.1.2.4. Bioblend 6 observació TD

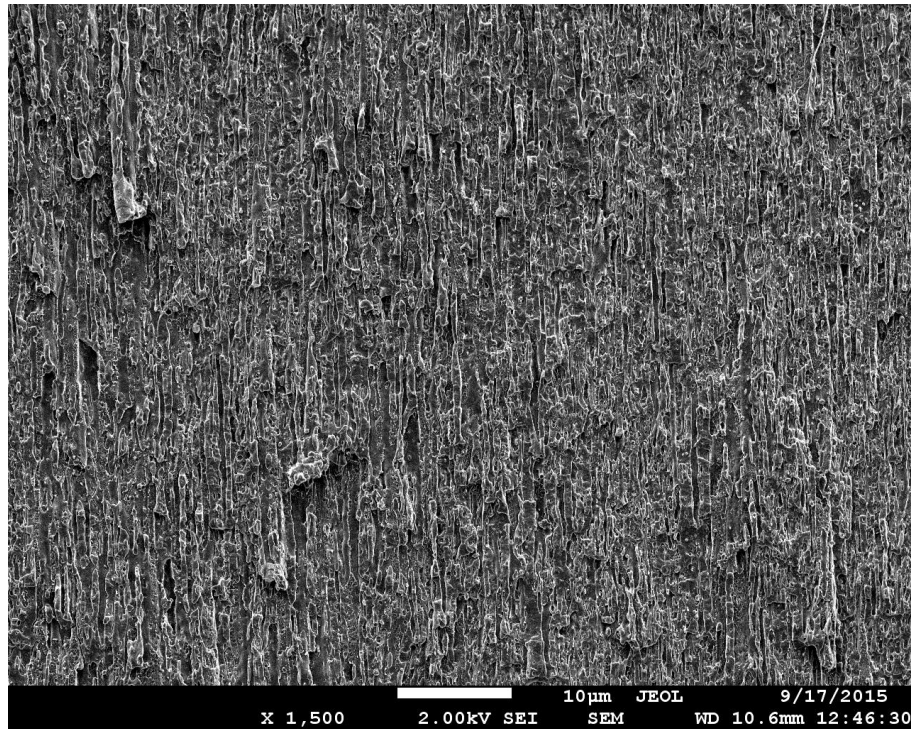


Figura 52: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 6. Mostra tallada en direcció MD, mostrant la direcció TD en la zona central. Mostra recoberta de tàntal. x1500 augments

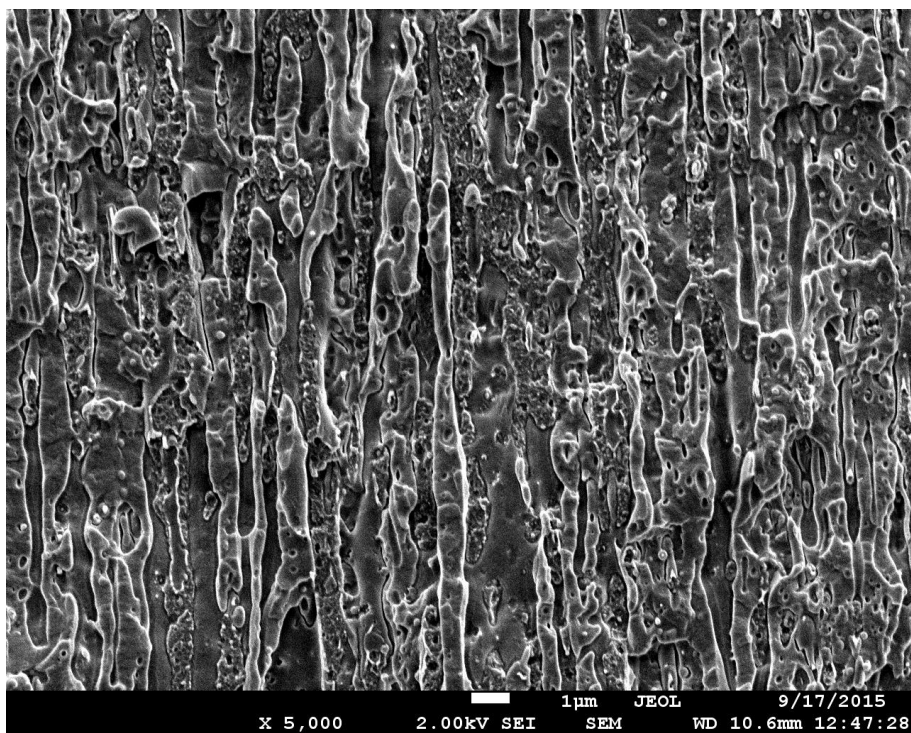


Figura 53: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 6. Mostra tallada en direcció MD, mostrant la direcció TD en la zona central. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments

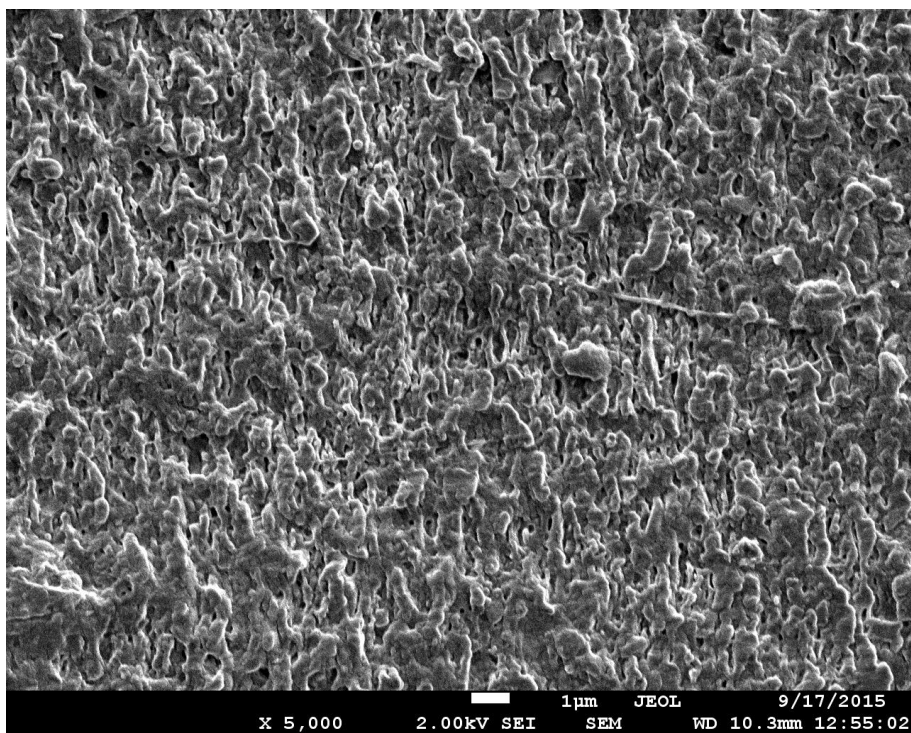


Figura 54: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 6. Mostra tallada en direcció

MD, mostrant la direcció TD en la zona central, més propera a la superfície de la placa. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments

6.1.2.5. Bioblend 3 observació MD

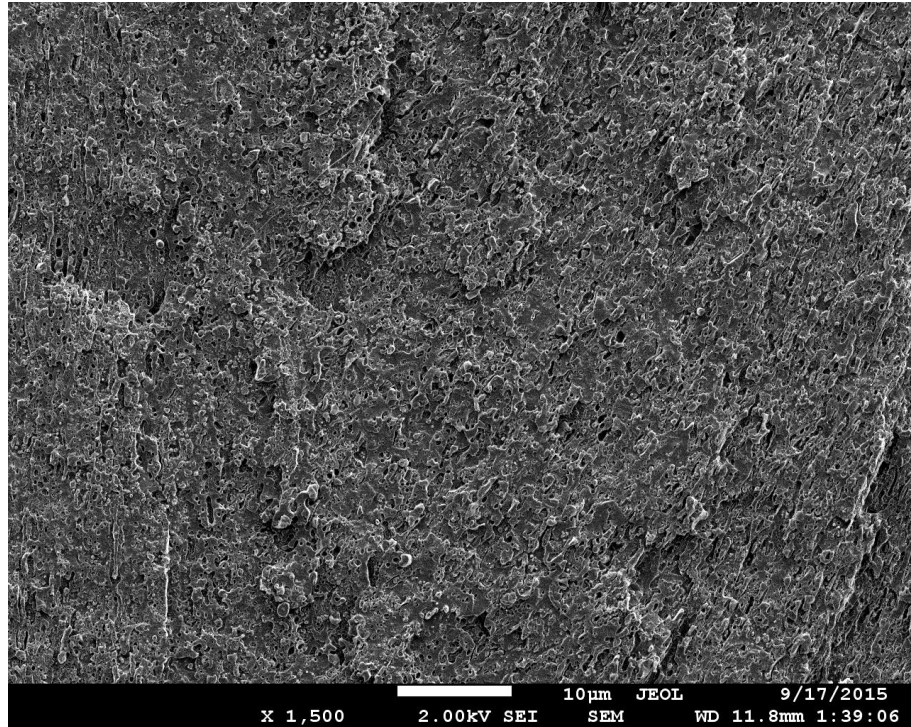


Figura 55: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 3. Mostra tallada en direcció TD, mostrant la direcció MD en un punt mig respecte el punt d'injecció. Mostra recoberta de tàntal. x1500 augments

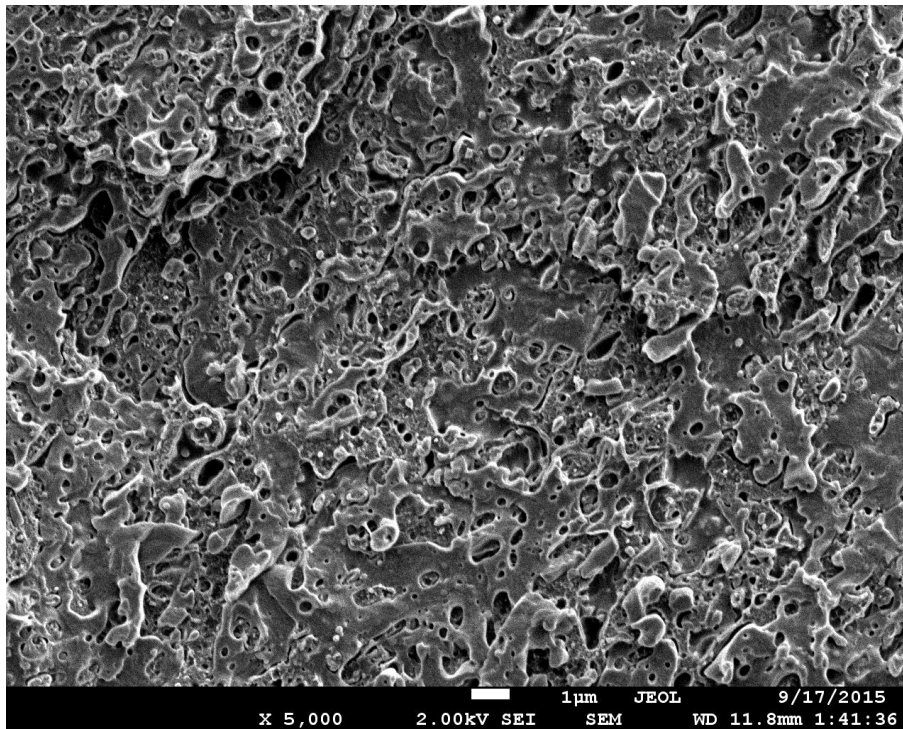


Figura 56: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 3. Mostra tallada en direcció TD, mostrant la direcció MD en un punt mig respecte el punt d'injecció. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments

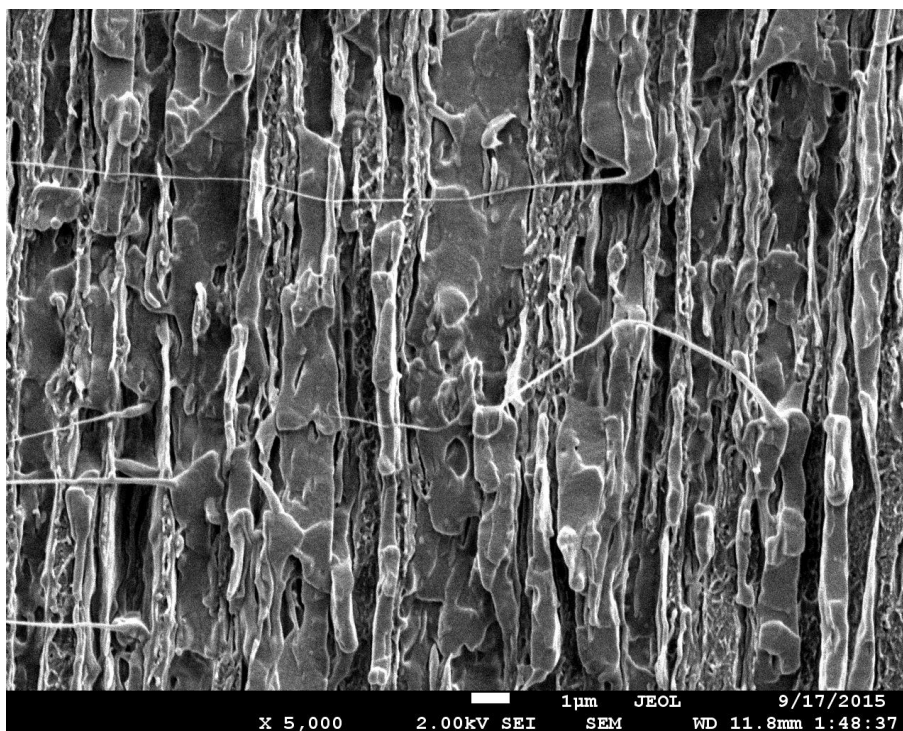


Figura 57: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 3. Mostra tallada en direcció

TD, mostrant la direcció MD en un punt mig respecte el punt d'injecció, proper a la superfície de la placa. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments.

6.1.2.6. Bioblend 3 observació TD

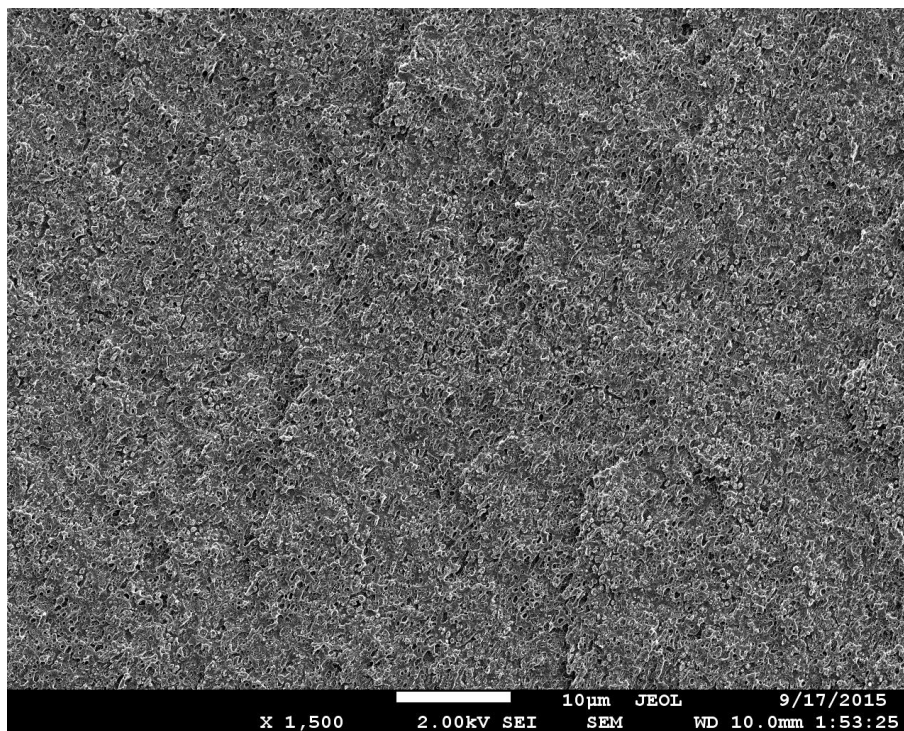


Figura 58: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 3. Mostra tallada en direcció MD, mostrant la direcció TD en la zona central. Mostra recoberta de tàntal. x1500 augments

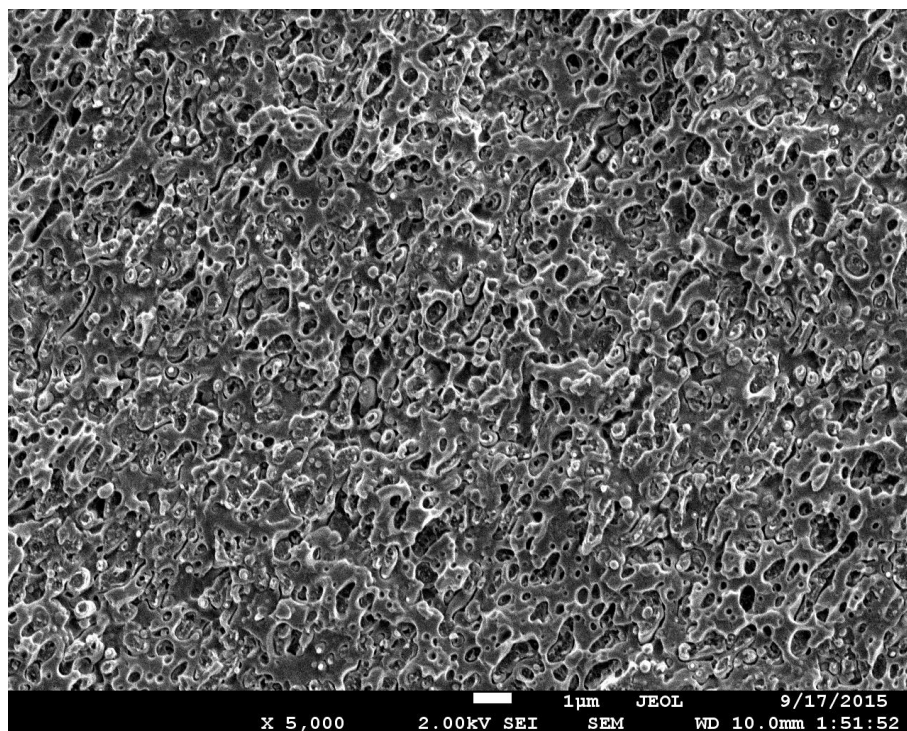


Figura 59: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 3. Mostra tallada en direcció MD, mostrant la direcció TD en la zona central. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments

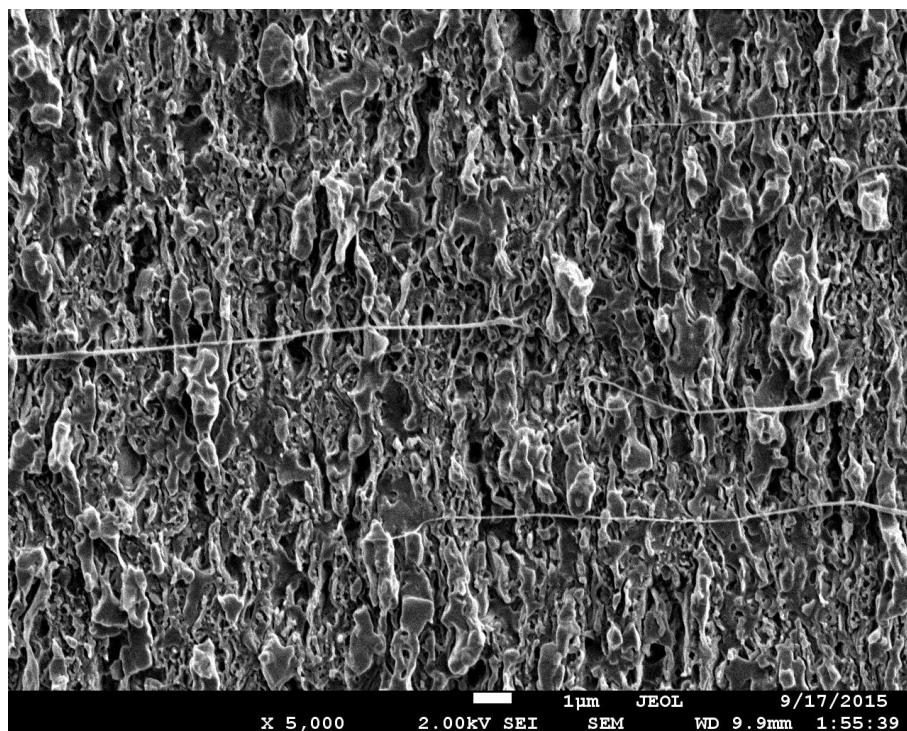


Figura 60: Micrografia SEM d'una placa de Bioblend 3. Mostra tallada en direcció

MD, mostrant la direcció TD en la zona central, més propera a la superfície de la placa. Mostra recoberta de tàntal. x5000 augments

6.2. Films

6.2.1. Tracció

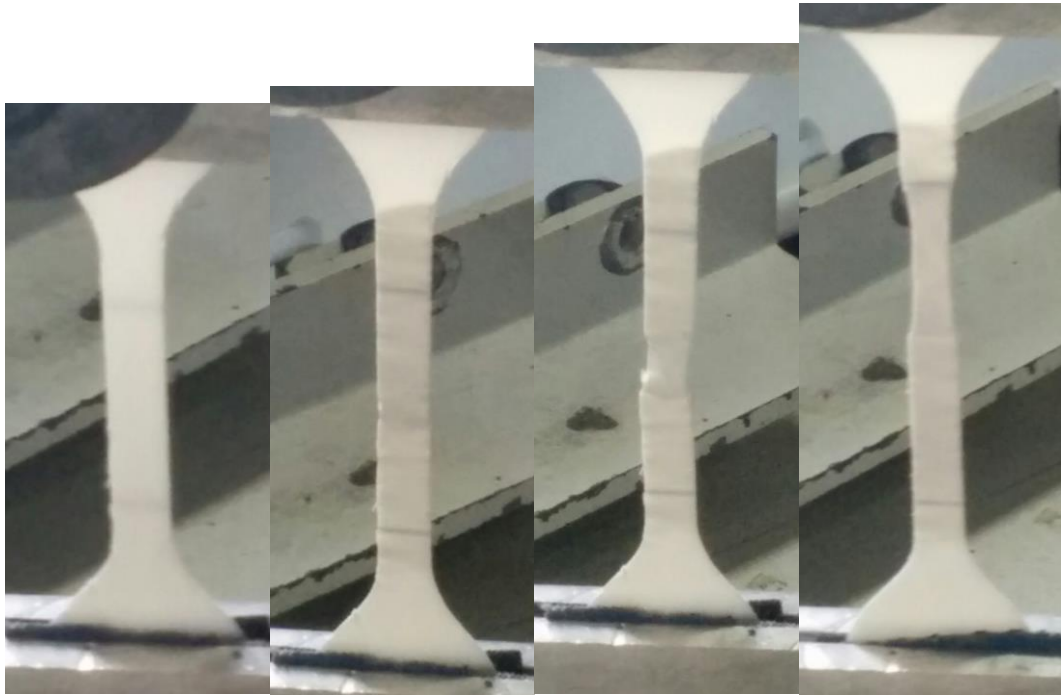


Figura 61: D'esquerra a dreta, evolució temporal en l'assaig de tracció de Bioblend 3: (a) moment d'iniciar l'assaig, (b) moment en que es passa el punt de fluència, (c) formació del coll i (d) deformació màxima abans d'arribar a ruptura.

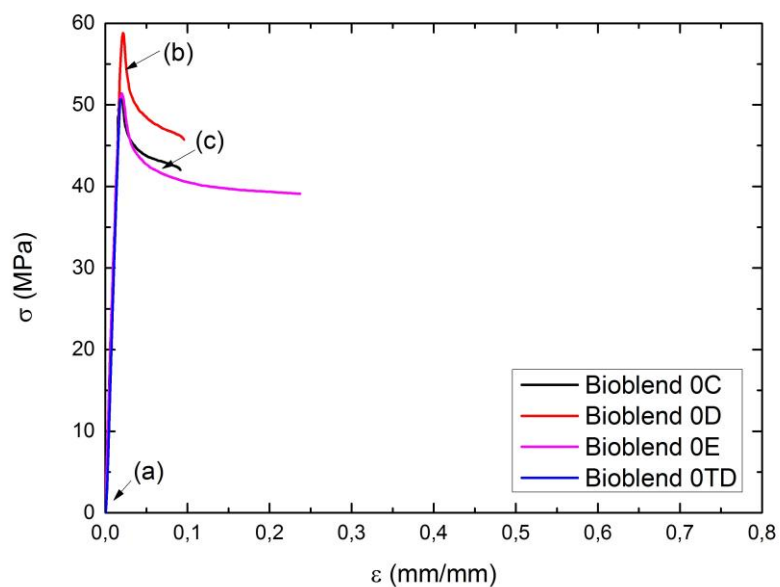


Figura 62: Resultats de les provetes amb 0% d'ABS-g

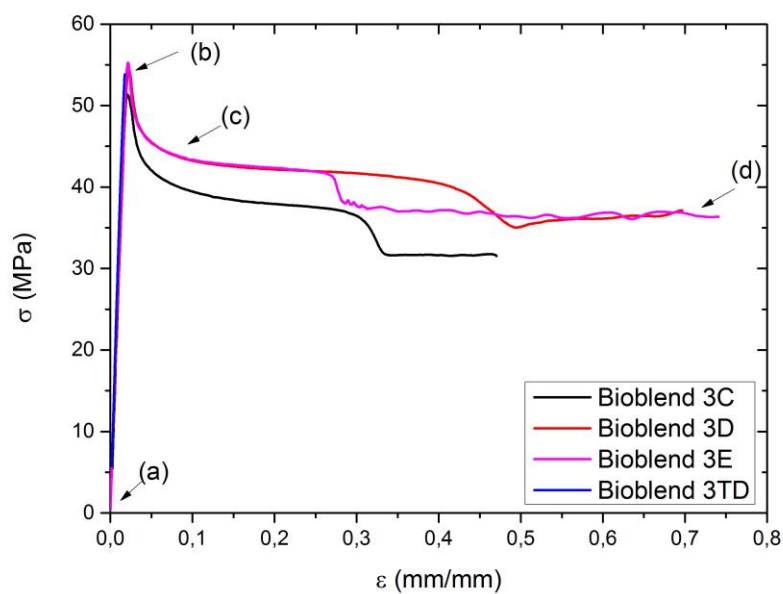


Figura 63: Resultats de les provetes amb 3% d'ABS-g

Taula 5: Paràmetres resultants de l'assaig de tracció

Material/Situació	E(GPa)	σ_y (MPa)	ϵ_y (mm/mm)	ϵ_b (mm/mm)
Mostres 0%				
0E	3,1 \pm 0,3	54 \pm 2	0,02 \pm 0,002	0,14 \pm 0,05
0C	3,0 \pm 0,3	54 \pm 2	0,02 \pm 0,003	0,1 \pm 0,08
0D	3,1 \pm 0,2	52 \pm 1	0,02 \pm 0,001	0,2 \pm 0,1
0TD	3,1 \pm 0,1	48 \pm 3	0,02 \pm 0,001	0,02 \pm 0,002
Mostres 3%				
3E	2,8 \pm 0,1	52 \pm 3	0,02 \pm 0,001	0,4 \pm 0,2
3C	2,9 \pm 0,2	55 \pm 1	0,020 \pm 0,0005	0,6 \pm 0,5
3D	3,0 \pm 0,3	55 \pm 1	0,02 \pm 0,003	1 \pm 0,9
3TD	3,2 \pm 0,2	52 \pm 2	0,02 \pm 0,001	0,02 \pm 0,001

En les corbes dels assajos de tracció (Figures 62 i 63) es pot veure com el punt de fluència en ambdós materials és pràcticament el mateix. Els resultats dels materials amb anhidrid maleic obtenen una elongació a ruptura significativament major, això implica que el Bioblend 3 aconsegueix compatibilitzar les fases de PLA i ABS creant una interfase més resistent i com a conseqüència es genera una ruptura més dúctil comparat amb una ruptura de caràcter més fràgil com la que té el Bioblend 0.

També es pot veure com en el Bioblend 3 hi ha una baixada de la tensió que suporta el material. En aquest punt es forma un coll en la proveta. Això pot ser degut a que la fase de REX-PLA ha cedit i en aquest moment qui suporta l'esforç aplicat és la fase ABS, doncs l'ABS té una tensió de fluència d'aproximadament 40 MPa.

Pel que fa als mecanismes de fractura que actuen en l'assaig de tracció es pot dir clarament que al formar-se un coll en la situació (d) el mecanisme de fractura que està actuant és el *Shear Yielding*. El que podria donar pas a la confusió és que el punt (c) es pot veure com es generen un seguit de bandes en direcció perpendicular a l'esforç. Aquestes bandes són microbandes de lliscament que podrien ser donades a la falta de cohesió entre la fase de REX-PLA i l'ABS.

Finalment també cal destacar que en ambdós films els assajos en direcció TD tenen una ruptura completament fràgil. Això implica que aquests films tenen el material orientat en direcció MD ja que quan s'assagen en direcció TD les cadenes estan en direcció perpendicular a l'esforç sol·licitat, fent que no es puguin desplaçar entre elles deformant la proveta i com a conseqüència s'arriba a ruptura al arribar a la tensió de fluència.

6.2.2. EWF

6.2.2.1. Comprovació de que el material compleix les condicions per estudiar EWF

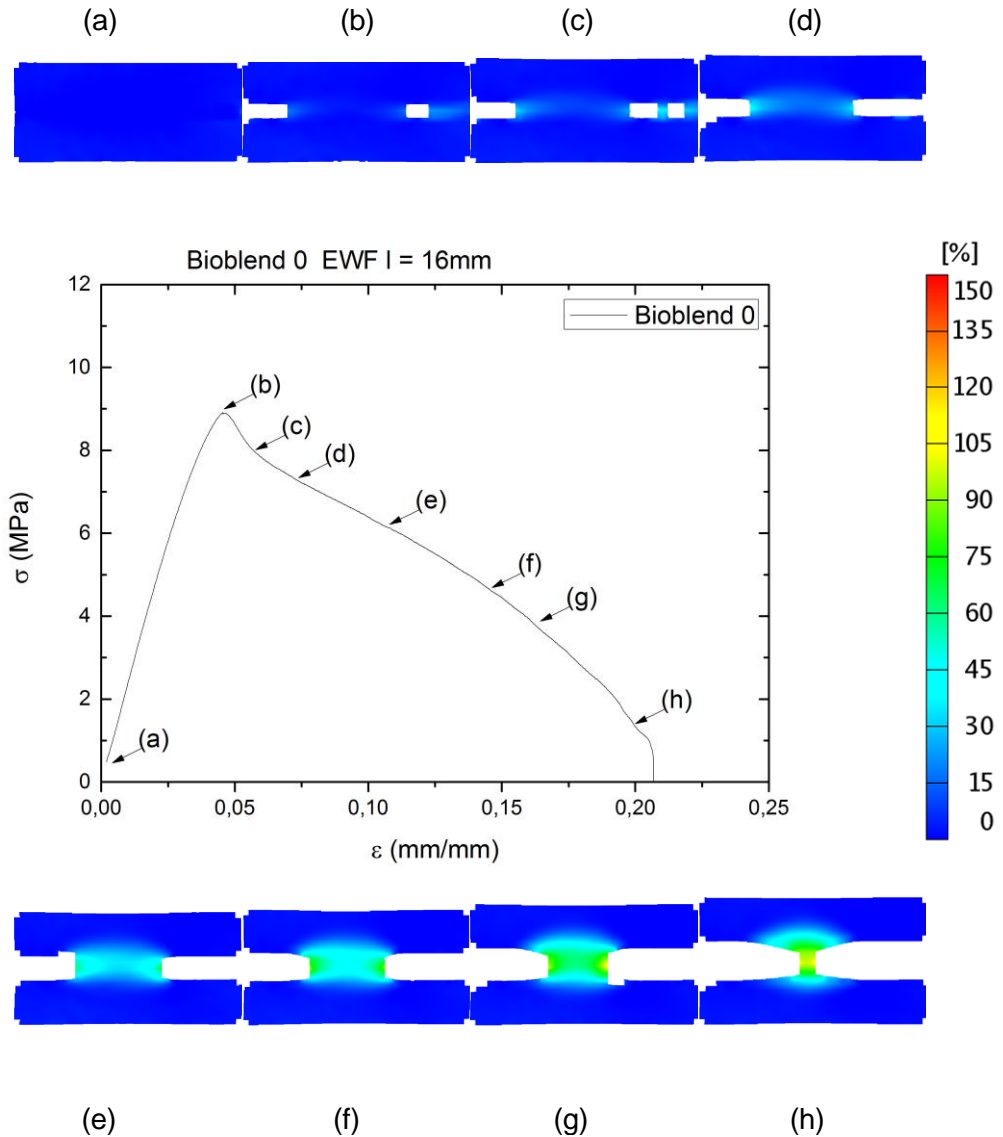


Figura 64: Resultat i camps de deformació durant la prova de l'assaig preliminar de treball essencial de fractura amb la mostra de Bioblend 0

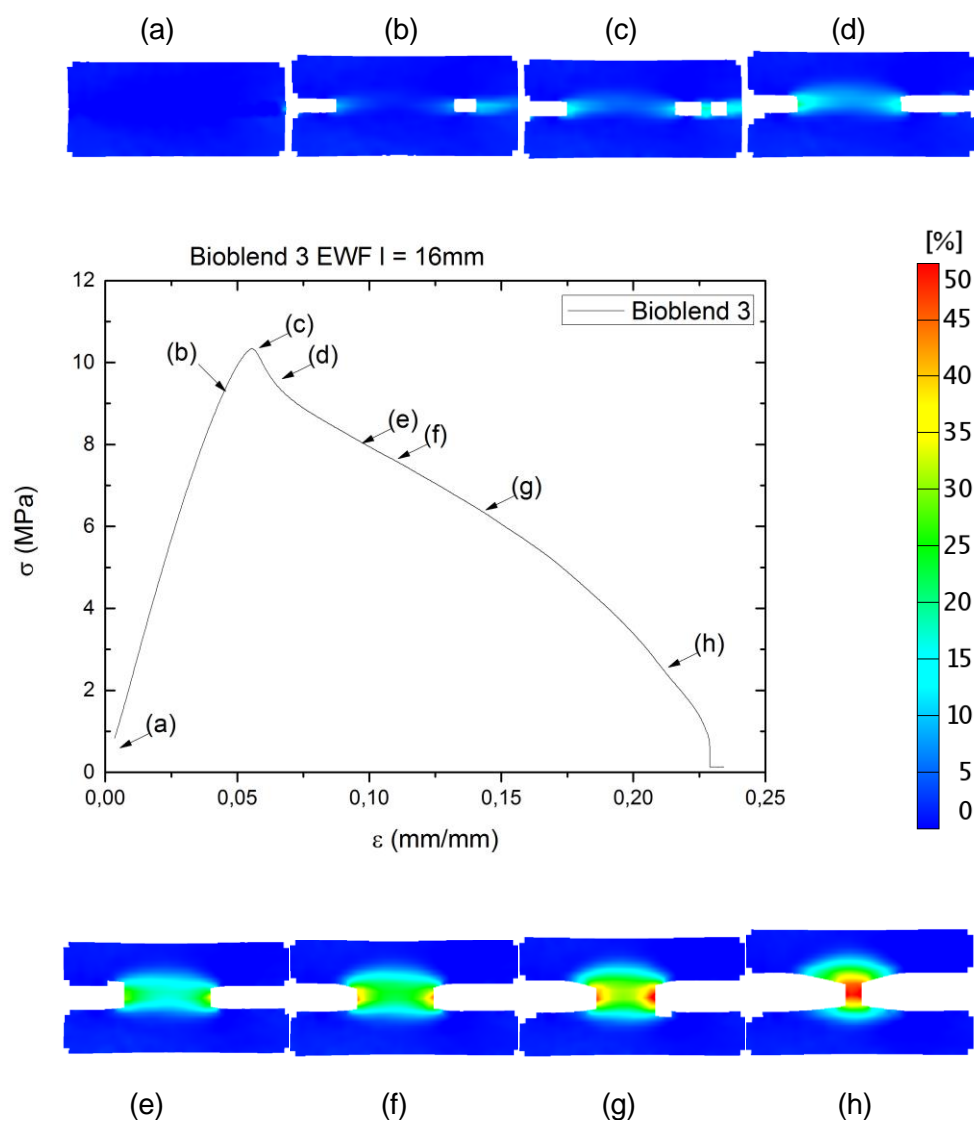


Figura 65: Resultat i camps de deformació durant la prova de l'assaig preliminar de treball essencial de fractura amb la mostra de Bioblend 3

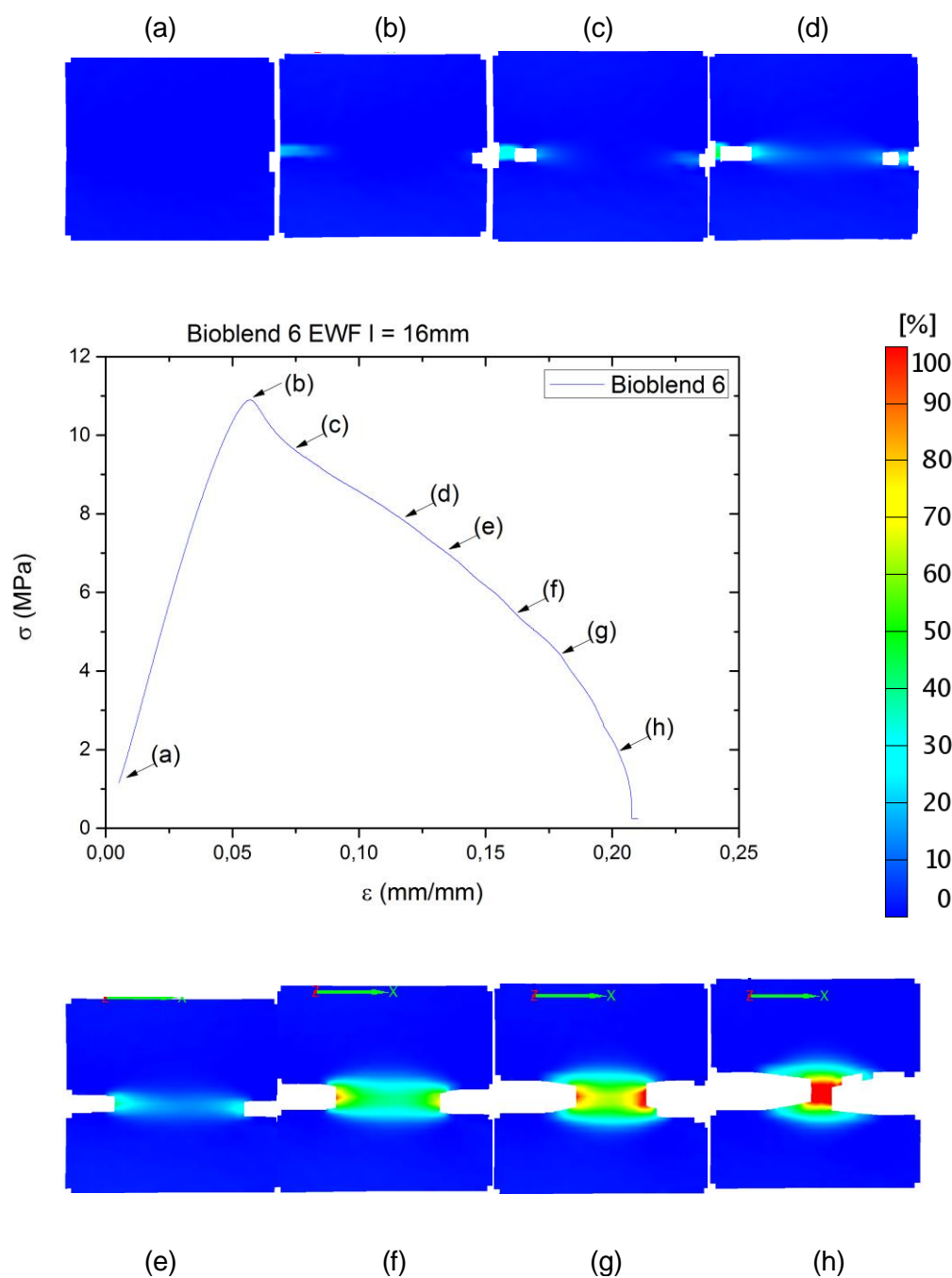


Figura 66 Resultat i camps de deformació durant la prova de l'assaig preliminar de treball essencial de fractura amb la mostra de Bioblend 6

En aquestes primeres mostres es pot comprovar com per una mateixa longitud de lligament hi ha un augment del treball necessari per a que el material fracturi. Això implica que ens indica que l'anhídrid maleic està compatibilitzant el material. Cal esmentar però que hi ha un augment de treball de fractura molt més elevat en el pas de 0% a 3% d'ABS-g-MAH que de 3% a 6%. Això podria ser degut a que en les condicions en les que s'ha extruït el film de 6% l'anhídrid maleic no ha tingut temps suficient com per a reaccionar completament amb el PLA. Una altra alternativa podria ser que el PLA, després d'haver reaccionat amb el SamfE ramificant la seva pròpia estructura i posteriorment tornant a reaccionar amb l'anhídrid maleic ja hagi saturat i no sigui capaç de reaccionar més amb l'anhídrid maleic en aquestes concentracions.

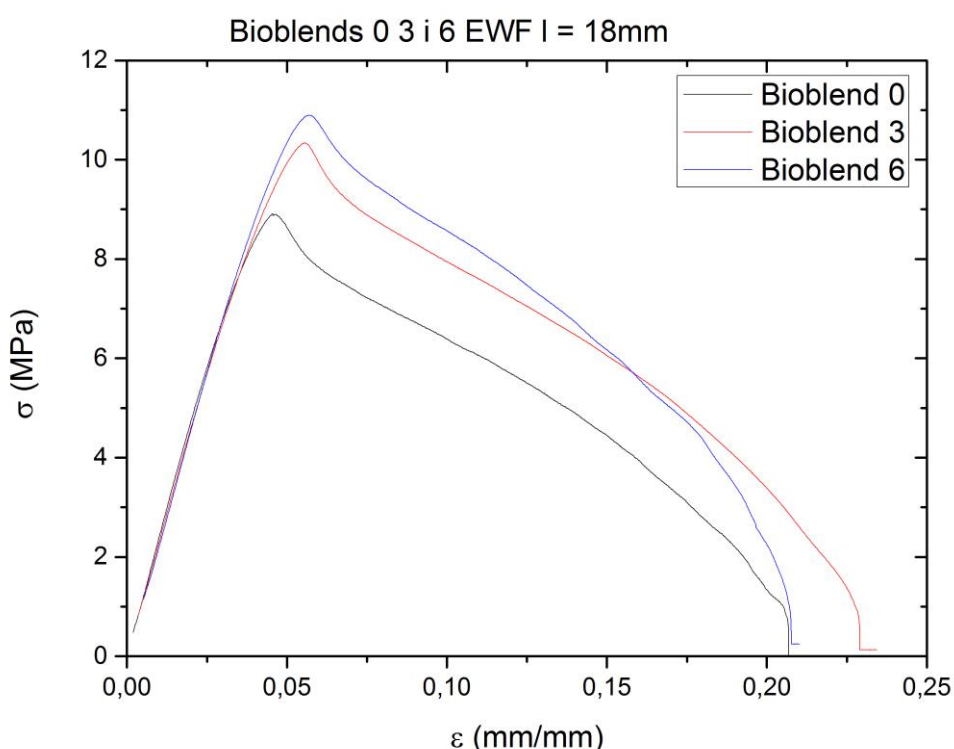


Figura 67: Superposició dels assajos preliminars de treball essencial de fractura dels tres materials

6.2.2.2. Resultats de les provetes per calcular el treball essencial de fractura

En el cas de les mostres de Bioblend 0 no s'ha aconseguit reproduir una fractura que tingui les condicions per estudiar treball essencial de fractura, degut a que han presentat fractura fràgil o la fractura no ha propagat de forma paral·lela. Això pot ser a conseqüència de dos factors: el primer que en el lligament hi hagi una zona amb una part de fase REX-PLA major que és més fràgil que l'ABS i que davant de l'esforç requereix trenqui de forma fràgil. Per altra

banda també pot ser degut a que l'agudització hagi estat mal mecanitzada i es creï una zona de concentració de tensions elevada que faci propagar la fractura de forma fràgil.

Per altra banda en el cas de les mostres de Bioblend 3 no s'ha aconseguit una sèrie amb suficients mostres per a poder tenir un bon càlcul del treball essencial de fractura tal i com es veu en la Figura 68.

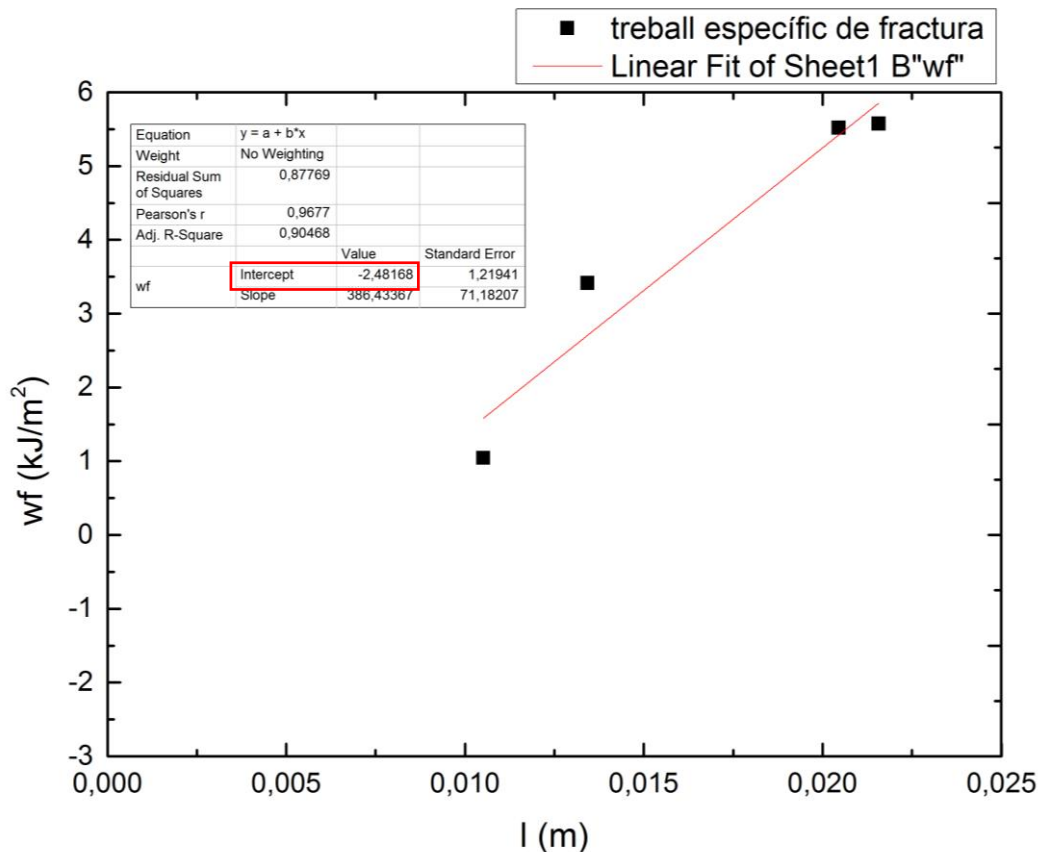


Figura 68: Resultats del càlcul del treball essencial de fractura, on es mostra que el resultat no és vàlid degut a que la intersecció en l'eix vertical és inferior a 0, cosa que no és possible.

7. Cost del projecte

El cost del projecte s'ha calculat segons les tarifes del CCP:

Assaig	sèrie inicial / hores inicial/mostra	sèrie addicional / mostres addicionals	cost sèrie inicial	cost sèrie addicional	cost total assaig
Tracció +EWF	1 sèrie	13 series	200€	120€/sèrie	1760€
Impacte pendular instrumentat	1 sèrie	9 series	280€	180€/sèrie	1900€
SEM	4h		180€		720€
MFI	1 sèrie	1 sèrie	150€	90€/sèrie	240€
IR	5 mostres		210€		1050€
Mecanitzat i entallat de provetes	24h		60€		1440€
TOTAL					7110€

8. Impacte mediambiental

Degut a que el material estudiat encara esta en procés de desenvolupament i no hi ha un procés de fabricació establert no es pot calcular quin ha sigut l'impacte ambiental de la producció del polímer. Tot i així si que es pot calcular quina és la diferència entre les emissions generades per l'ABS i el REX-PLA/ABS en cas que aquest material sigui capaç de substituir-lo..

$$1 \text{ mol d'ABS} \equiv 1 \text{ mol de REX - PLA/ABS}$$

$$\begin{array}{lcl} 1 \text{ Butadiè (C}_4\text{H}_6\text{)} & & 0,3 \text{ Butadiè (C}_4\text{H}_6\text{)} \\ 1 \text{ Acrilonitril (C}_3\text{H}_2\text{N)} & \equiv & 0,3 \text{ Acrilonitril (C}_3\text{H}_2\text{N)} \\ 1 \text{ Estirè: (C}_8\text{H}_8\text{)} & & 0,3 \text{ Estirè: (C}_8\text{H}_8\text{)} \end{array}$$

Si es calcula la generació de CO₂ per cada kg d'ABS

$$\frac{15 \text{ mol C}}{1 \text{ mol d'ABS}} \cdot \frac{1 \text{ mol CO}_2}{1 \text{ mol C}} \cdot \frac{44 \text{ g CO}_2}{1 \text{ mol CO}_2} = 660 \text{ g } \frac{\text{CO}_2}{\text{mol d'ABS}}$$

$$\frac{15 \text{ mol C} + 16 \text{ mol H} + 1 \text{ mol N}}{1 \text{ mol d'ABS}} \cdot \frac{15 \cdot 12 + 16 \cdot 1 + 1 \cdot 14 \text{ g d'ABS}}{15 \text{ mol C} + 16 \text{ mol H} + 1 \text{ mol N}} = \frac{210 \text{ g d'ABS}}{\text{mol d'ABS}}$$

$$1000 \text{ g d'ABS} \cdot \frac{\frac{660 \text{ g CO}_2}{\text{mol d'ABS}}}{\frac{210 \text{ g d'ABS}}{\text{mol d'ABS}}} = \frac{3143 \text{ g CO}_2}{1 \text{ kg d'ABS}}$$

Si es sap que gràcies a que el REX-PLA és un material biodegradable i que per tant no genera CO₂ al degradar-se, es pot considerar que el REX-PLA/ABS tan sols genera un 30% del CO₂ del que genera l'ABS i per tant s'estalvia un total de 2,2kg CO₂ per cada kg d'ABS substituït per REX-PLA/ABS.

Conclusions

La mescla Bioblend 0 presenta una morfologia amb unes fases d'ABS grans generant una interfase dèbil. Això implica tenir unes propietats mecàniques pobres amb una elongació de ruptura i resistència a l'impacte baixes.

S'ha comprovat que l'anhidrid maleic és un compatibilitzant efectiu de cara a les mescles de PLA i ABS. La compatibilitat de fases implica un augment si de la elongació a ruptura i de la resistència a l'impacte en el Bioblend 3, així com també del treball essencial de fractura, per ara de forma qualitativa, en els materials Bioblend 3 i Bioblend 6. Morfològicament també es pot identificar unes fases d'ABS de menor mida, generant una interfase molt més resistent que la intercara del Bioblend 0.

Continuació de l'estudi

Per tal de continuar endavant la investigació sobre el REX-PLA/ABS humilment es proposen diferents camps que podrien resultar interessants d'explorar.

Primerament es suggereix tornar a extruir el film de Bioblend 6 (REX-PLA/ABS/ABS-g-MAH 70/24/6) per tal de poder fer assajos de tracció i de treball essencial de fractura amb aquest material i així poder comparar com es comporta respecte el Bioblend 0 i 3. D'aquesta manera es podrà estimar quin percentatge en pes d'ABS-g-MAH seria l'ideal per maximitzar les prestacions de la mescla REX-PLA/ABS.

També es proposa repetir els assajos de EWF per tal de poder trobar el treball essencial de fractura amb els diferents materials. En el cas del Bioblend 0 repetir els assajos i si segueixen sense ser vàlids procurar identificar per SEM la morfologia de la superfície de fractura per tal de conèixer quina és la raó per la que trenca de forma fràgil.

També s'anima a fer una microscòpia SEM de la superfície de fractura dels assajos de tracció de les mostres de Bioblend 3 per tal de saber exactament confirmar si la davallada sobtada de tensió durant la deformació plàstica és deguda a que la única fase que manté la consistència del material és l'ABS.

Per altra banda també es convida a fer assajos de DMTA. En un principi estava planejat que es duguessin a terme durant aquest projecte però degut a la impossibilitat de calibrar la màquina per falta de la peça de calibratge no s'han dut a terme.

Al ser aquest material un possible substitut de l'ABS en indústries com les de l'automoció, on un factor primordial es basa en la reducció màxima possible del pes, es convida a seguir investigant com s'està fent en el Centre Català del Plàstic el comportament d'aquests materials formant microespumes per comprovar si es poden aconseguir materials amb unes propietats mecàniques específiques superiors.

Finalment també es proposa analitzar com influeix l'ABS en la biodegradabilitat de la fase REX-PLA, per tal de comprovar si es pot aconseguir biodegradar el 100% del PLA del material o si la fase d'ABS o la reacció de l'anhídrid maleic ho permeten o obliguen a modificar les condicions per a que es pugui biodegradar.

Agraïments

Voldria donar el meu més profund agraïment a la Dra. Maria Lluïsa MasPOCH, directora d'aquest treball fi de grau, pel suport, gestió i totes les ensenyances que m'ha transmès durant el període d'aquest projecte així com per obrir-me les portes les instal·lacions del Centre Català del Plàstic per fer el projecte.

També voldria agrair al Dr. Orlando Santana la seva gran contribució, implicació i ajuda en aquest projecte, qui ha sigut un guia i una gran font de coneixement .

A en Bruno, meu company de despatx a Terrassa, i a tots membres del CCP que han fet que els moments de treball més carregosos sigui més lleugers gràcies als seus consells i companyia.

I finalment a la meva família, que sempre han sigut al meu costat animant-me i donant-me suport per a seguir estudiant.

A tots vosaltres, moltíssimes gràcies.



Bibliografia

- [1] N. Constans, “*Preparación y caracterización de mezclas REX-PLA / ABS*” Proyecto final de carrera. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona (2015).
- [2] (2015). eMolecules: Chemical Structure Drawing Search.: n/a. www.emolecules.com
- [3] L. Espejo, “*Modificación estructural de Poli(Acido Láctico) (PLA) mediante extrusión reactiva: estudio preliminar en mezclador interno escala laboratorio.*” Proyecto final de carrera. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona (2011).
- [4] Cailloux, J., O.O. Santana, Maspoch M.LI., Bou, J.J., Carrasco, F. “Using viscoelastic properties to quatitatively estimate the amount of modified poly(lactic acid) chains through reactive extrusion,” *Journal of Rheology* 59, 1191 (2015); DOI: 10.1122/1.4928071
- [5] Cailloux, J. Hakim, R.N., Santana, O.O., Sanchez Soto, M., Franco Urquiza. E., Carrasco, F.”Sheets of Poly(Lactide) / O-MMT prepared by one-step reactive exstrusion-calendering process.” ECCM16-16th european conference on composite materials, Sevilla, Espanya, 22-26 de juny 2014.
- [6] Cailloux, J., Santana, O.O, Franco Urquiza, E., Bou, J.J., Carrasco, F., Gámez Pérez, J., Maspoch M.LI. “Sheets of branched poly(lactic acid) obtained by one step reactive extrusion calendering pocess: Melt rheology analysis,” *eXPRESS Polymer Letters* Vol.7, No.3 (2013) 304-318.
- [7] Cailloux J., “*Modified Poly(lactic acid) sheets manufactured by One-Step Reactive Extrusion-Calendering: Thermal, Rheological, Mechanical and Fracture Behaviours*”, Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona (2015).
- [8] Pai, F.C., Lai, S.M., Chu, H.H. “ Characterization and Properties of Reactive Poly(lactic acid)/Polyamide 610 Biomass Blends,” *Wiley Online Library* (2013) DOI: 10.1002/app.39473
- [9] Li, Y., Shimizu, H. “Improvement in toughness of poly(L-lactide) (PLLA) through reactive blending with acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer (ABS): Morphology and properties,” *European Polymer Journal* 45 (2009) 738-746.
- [10] Sun, S., Zhang,M., Zhang, H., Zhang, X. “Polylactide Toughening with Epoxy-Functionalized Grafted Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Particles,”*Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 122, 2992-2999 (2011) DOI: 10.1002/app.34111
- [11] Jo, M.Y., Ryu, Y.J., Ko, J.H., Yoon, J.S “Effects of Compatibilizers on the Mechanical Properties of ABS/PLA Composites,” *Journal of Applied Polymer Science*, Vol 125, E231-E238 (2012) DOI: 10.1002/app.36372
- [12] Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits. “IPC-TM-650 Test Methods Manual”. Northbrook, Illinois Estats Units. (Setembre 1995)
- [13] A.B. Martínez, J. Gamez-Perez, M. Sanchez-Soto, J.I. Velasco, O.O. Santana, M. LI Maspoch. “The Essential Work of Fracture (EWF) method – Analyzing

the Post-Yielding Fracture Mechanics of polymers” Engineering Failure Analysis, 16, 2604-2617 (2009). DOI: 10.1016/j.engfailanal.2009.04.027

- [14] Moore, D.R. Pavan, A. Williams, J.G. (2001), *Fracture mechanics testing methods for polymers, adhesives and composites*. 1a edició. Països Baixos.ESIS Publication 28. ISBN 0080436897.



Bibliografia complementària

- [15] O.O. Santana, "*Estudio de la fractura de mezclas de policarbonato con acrolonitrilo-butadieno-estireno*", Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona (1997).
- [16] Zuñiga J. , "*Técnicas experimentales de física general: Propagación de errores*" Universitat de València.
- [17] Xiuzi S.Sun, (2012) "*Handbook of biopolymers and biodegradable plàstics*" William Andrew. *Estats Units* ISBN: 978-1-4557-2834-3

Annexes

A. FITXES TÈCNIQUES DEL PLA I L'ABS DEL CES EDUPACK 2013

A.1 PLA

Identification**Designation**

Polylactide / Polylactic acid

Tradenames

BOPLA; LACEA; Lactel; NatureWorks PLA; Purasorb

General Properties

Density	1.21e3	-	1.25e3	kg/m ³
Price	* 1.75	-	2.11	EUR/kg

Composition overview**Composition (summary)**(C₃H₄O₂)_n

Base	Polymer
Polymer class	Thermoplastic : amorphous
Polymer type	PLA
Polymer type full name	Polylactic acid / polylactide
Filler type	Unfilled

Composition detail (polymers and natural materials)

Polymer	100	%
---------	-----	---

Mechanical properties

Young's modulus	3.45	-	3.83	GP a
Compressive modulus	* 3.45	-	3.83	GP a
Flexural modulus	3.45	-	3.8	GP a
Shear modulus	* 1.23	-	1.37	GP a
Bulk modulus	* 5.7	-	6.3	GP a
Poisson's ratio	* 0.38	-	0.4	
Shape factor	6.34			
Yield strength (elastic limit)	48	-	60	MP a
Tensile strength	48	-	60	MP a
Compressive strength	* 48	-	60	MP a
Flexural strength (modulus of rupture)	81.5	-	99.2	MP a
Elongation	2	-	6	% strain
Hardness - Vickers	* 14	-	18	HV
Hardness - Rockwell M	67	-	87	
Hardness - Rockwell R	110	-	120	
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 14	-	18	MP a
Fracture toughness	* 0.7	-	1.1	MP a.m ^{0.5}
Mechanical loss coefficient (tan delta)	0.02	-	0.1	

Impact properties

Impact strength, notched 23 °C	1.29	-	2.59	kJ/m ²
--------------------------------	------	---	------	-------------------

Thermal properties

Melting point	160	-	178	°C
Glass temperature	56	-	58	°C
Heat deflection temperature 0.45MPa	54	-	56	°C
Heat deflection temperature 1.8MPa	* 48	-	50	°C
Maximum service temperature	* 45	-	55	°C
Minimum service temperature	-12			°C
Thermal conductivity	0.12	-	0.13	W/m.°C
Specific heat capacity	1.18e3	-	1.21e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	* 126	-	145	µstrain/°C
Vicat softening point	56	-	58	°C

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data



Processing properties

Linear mold shrinkage	0.4		%
Melt temperature	170	- 230	°C
Mold temperature	10	- 38	°C
Molding pressure range	* 67	- 68	MPa

Electrical properties

Electrical resistivity	* 1e17	- 1e19	μohm.cm
Dielectric constant (relative permittivity)	* 3.5	- 5	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	* 0.02	- 0.07	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	* 12	- 16	MV/m

Optical properties

Refractive index	1.4		
Transparency	Transparent		

Absorption, permeability

Water vapor transmission	7.1	- 9.1	g.mm/m².day
Permeability (O2)	11	- 53	cm³.mm/m².day.atm

Durability: flammability

Flammability	Highly flammable		
--------------	------------------	--	--

Durability: fluids and sunlight

Water (fresh)	Acceptable		
Water (salt)	Acceptable		
Weak acids	Acceptable		
Strong acids	Unacceptable		
Weak alkalis	Acceptable		
Strong alkalis	Unacceptable		
Organic solvents	Limited use		
UV radiation (sunlight)	Good		
Oxidation at 500C	Unacceptable		

Primary material production: energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production	* 49	- 54.2	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	* 3.43	- 3.79	kg/kg
Water usage	* 65.6	- 72.5	l/kg

Material processing: energy

Polymer extrusion energy	* 5.7	- 6.3	MJ/kg
Polymer molding energy	* 15.4	- 17	MJ/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 0.89	- 0.983	MJ/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 4.62	- 5.11	MJ/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 8.77	- 9.69	MJ/kg

Material processing: CO2 footprint

Polymer extrusion CO2	* 0.428	- 0.473	kg/kg
Polymer molding CO2	* 1.15	- 1.27	kg/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0.0667	- 0.0737	kg/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 0.347	- 0.383	kg/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 0.657	- 0.727	kg/kg

Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction

Recycle	✓		
Embodied energy, recycling	* 16.6	- 18.4	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 1.16	- 1.29	kg/kg

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

Recycle fraction in current supply	0.1		%
Downcycle	✓		
Combust for energy recovery	✓		
Heat of combustion (net)	* 18.8	- 19.8	MJ/kg
Combustion CO2	* 1.79	- 1.88	kg/kg
Landfill	✓		
Biodegrade	✓		
A renewable resource?	✓		

Notes**Typical uses**

Biodegradable packing and disposables. Food packaging, plastic bags, plant pots, diapers, bottles, cold drink cups, sheet and film.

Other notes

This PLA grade is amorphous. PLA can also be semi-crystalline. Various blends of D and L enantiomers are available, making available a broader range of properties.

Links

[ProcessUniverse](#)

[Producers](#)

[Reference](#)

[Shape](#)

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data



A.2 ABS



ABS (injection molding, platable)

Page 1 of 3

Identification

Designation

Acrylonitrile Butadiene Styrene (Injection Molding, platable)

Tradenames

Abelac; Abifor; Abstron; Absylux; Acstyr; Akmaril; Alcom; Anjalin; Aplax; Arradur; Astalac; Athpol; Aurocrl; Bapolan; Bulksam; Certene; Cevian; Claradex; Collimate; Compolac; Cycoele; Cycogel; Cycolac; Dafnelac; Denisab; Diapet; Diastat; Dynacom; Endura; Ensipur; Espree; Estadiene; Excelloy; Faradex; Farralloy; Fiberfil; Forsan; Hanalac; Highlac; Hiloy; Hylac; Isolac; Isopak; Kane Ace; Kapstone; Kralastic; Lastilac; Lupros; Lustran; Lustropak; Magnum; Nevies; Nilac; Novodur; Osstyrol; Palran; Perlac; Permastat; Plasfil; Polidux; POLYabs; Polyfabs; Polyflam; Polylac; Polyman; Porene; Pre-Elec; Remex; Retain; Ronfalin; Rotec; Santac; Senosan; Seracril; Shinko-lac; Sicoflex; Sinkral; Starex; Stylac; Suprex; Tairilac; Taitalac; Tarodur; Tecaran; Techno; Tekral; Terblend; Terez; Terturan; Tomax; Toyolac; Toyolacparel; Triax; Tufbaria; Tynab; UdAxs; Ultrasty; Umasty; Unibrite; Vampsab; Whistatt

General Properties

Density	1.04e3	-	1.07e3	kg/m ³
Price	* 2.26	-	2.49	EUR/kg

Composition overview

Composition (summary)

Block terpolymer of acrylonitrile (15-35%), butadiene (5-30%), and Styrene (40-60%).

Base	Polymer
Polymer class	Thermoplastic : amorphous
Polymer type	ABS
Polymer type full name	Acrylonitrile butadiene styrene
Filler type	Unfilled

Composition detail (polymers and natural materials)

Polymer	100	%
---------	-----	---

Mechanical properties

Young's modulus	2.21	-	2.62	GPa
Compressive modulus	* 2.21	-	2.62	GPa
Flexural modulus	2.34	-	2.68	GPa
Shear modulus	* 0.79	-	0.937	GPa
Bulk modulus	* 3.86	-	4.06	GPa
Poisson's ratio	* 0.391	-	0.407	
Shape factor	5.6			
Yield strength (elastic limit)	42	-	46	MPa
Tensile strength	42	-	46	MPa
Compressive strength	* 52.8	-	58.2	MPa
Flexural strength (modulus of rupture)	72.4	-	79.3	MPa
Elongation	* 15.3	-	20.9	% strain
Hardness - Vickers	* 13.2	-	14.6	HV
Hardness - Rockwell M	* 66	-	72	
Hardness - Rockwell R	103	-	109	
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 14	-	18.2	MPa
Fracture toughness	1.9	-	2.1	MPa.m ^{0.5}
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 0.0153	-	0.0181	

Impact properties

Impact strength, notched 23 °C	10.7	-	23.1	kJ/m ²
Impact strength, notched -30 °C	4.88	-	10.9	kJ/m ²
Impact strength, unnotched 23 °C	110	-	200	kJ/m ²
Impact strength, unnotched -30 °C	64.3	-	200	kJ/m ²

Thermal properties

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

Glass temperature	100	-	110	°C
Heat deflection temperature 0.45MPa	102	-	106	°C
Heat deflection temperature 1.8MPa	88	-	106	°C
Maximum service temperature	63	-	77	°C
Minimum service temperature	-45	-	-35	°C
Thermal conductivity	* 0.254	-	0.264	W/m.°C
Specific heat capacity	* 1.68e3	-	1.75e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	84.6	-	95.4	µstrain/°C

Processing properties

Linear mold shrinkage	0.5	-	0.8	%
Melt temperature	137	-	260	°C
Mold temperature	50	-	70	°C
Molding pressure range	55	-	172	MPa

Electrical properties

Electrical resistivity	3.3e21	-	3e22	µohm.cm
Dielectric constant (relative permittivity)	2.8	-	3.2	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	0.003	-	0.006	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	18.5	-	21.7	MV/m
Comparative tracking index	400	-	600	V

Optical properties

Refractive index	1.53	-	1.54	
Transparency	Opaque			

Absorption, permeability

Water absorption @ 24 hrs	* 0.2	-	0.45	%
Water vapor transmission	2.04	-	3.2	g.mm/m².day
Permeability (O2)	47.3	-	78.5	cm³.mm/m².day.atm

Durability: flammability

Flammability	Highly flammable			
--------------	------------------	--	--	--

Durability: fluids and sunlight

Water (fresh)	Excellent			
Water (salt)	Excellent			
Weak acids	Excellent			
Strong acids	Limited use			
Weak alkalis	Acceptable			
Strong alkalis	Excellent			
Organic solvents	Unacceptable			
UV radiation (sunlight)	Poor			
Oxidation at 500C	Unacceptable			

Primary material production: energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production	* 90.3	-	99.9	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	* 3.64	-	4.03	kg/kg
Water usage	* 167	-	185	l/kg

Material processing: energy

Polymer extrusion energy	* 5.81	-	6.42	MJ/kg
Polymer molding energy	* 18.3	-	20.2	MJ/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 0.974	-	1.08	MJ/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 5.47	-	6.04	MJ/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 10.5	-	11.6	MJ/kg

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data



Material processing: CO2 footprint

Polymer extrusion CO2	* 0.436	- 0.481	kg/kg
Polymer molding CO2	* 1.37	- 1.52	kg/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0.0731	- 0.0808	kg/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 0.41	- 0.453	kg/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 0.784	- 0.867	kg/kg

Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction

Recycle	✓		
Embodied energy, recycling	* 30.7	- 33.9	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 1.24	- 1.37	kg/kg
Recycle fraction in current supply	3.8	- 4.2	%
Downcycle			
Combust for energy recovery	✓		
Heat of combustion (net)	* 37.6	- 39.5	MJ/kg
Combustion CO2	* 3.06	- 3.22	kg/kg
Landfill	✓		
Biodegrade	✗		
A renewable resource?	✗		

Notes**Typical uses**

Safety helmets; camper tops; automotive instrument panels and other interior components; pipe fittings; home-security devices and housings for small appliances; communications equipment; business machines; plumbing hardware; automobile grilles; wheel covers; mirror housings; refrigerator liners; luggage shells; tote trays; mower shrouds; boat hulls; large components for recreational vehicles; weather seals; glass beading; refrigerator breaker strips; conduit; pipe for drain-waste-vent (DWV) systems.

Warning

HDT 1.8 covers unannealed to annealed samples. HDT 0.45 is for annealed

Links

ProcessUniverse

Producers

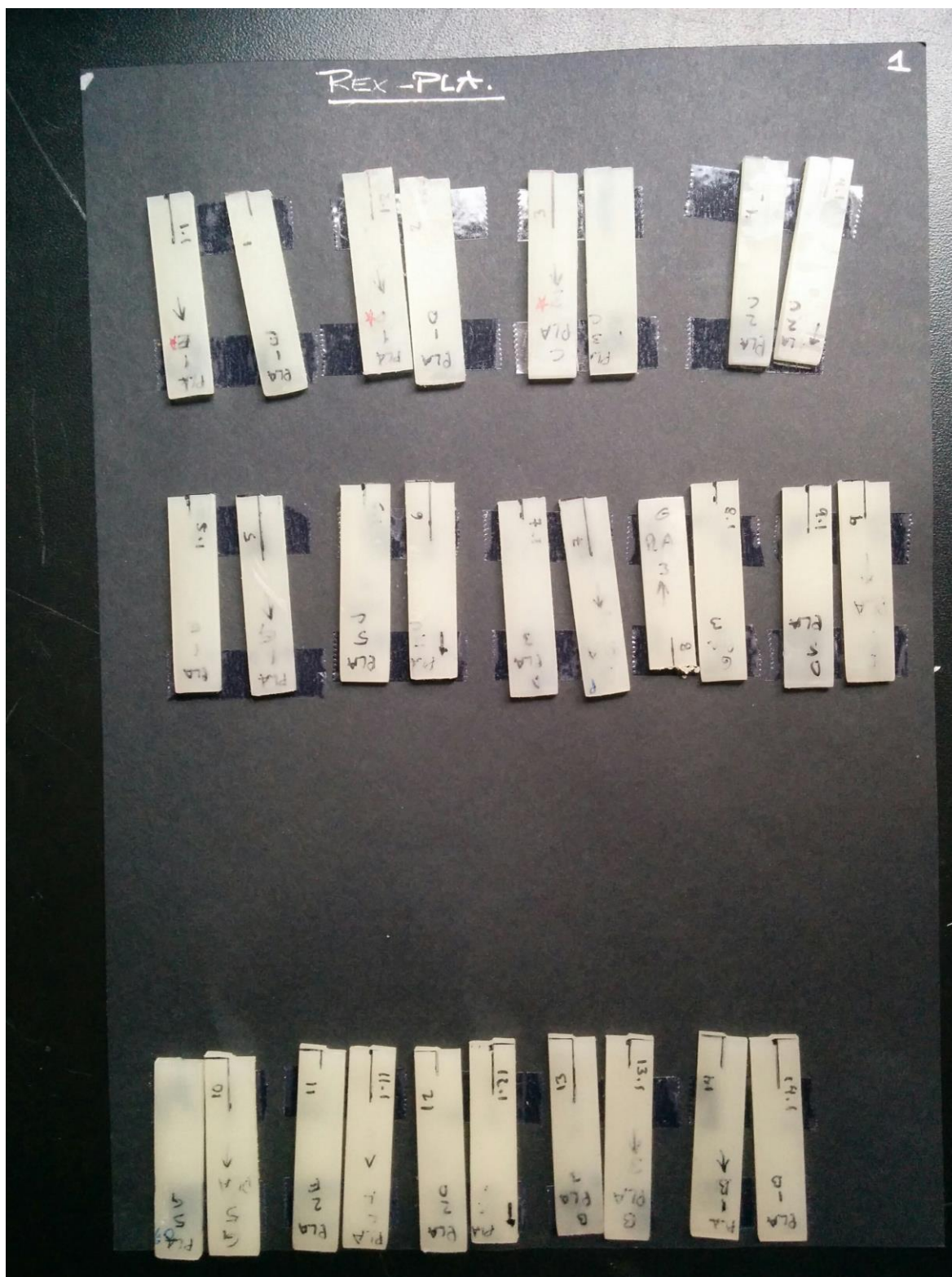
Reference

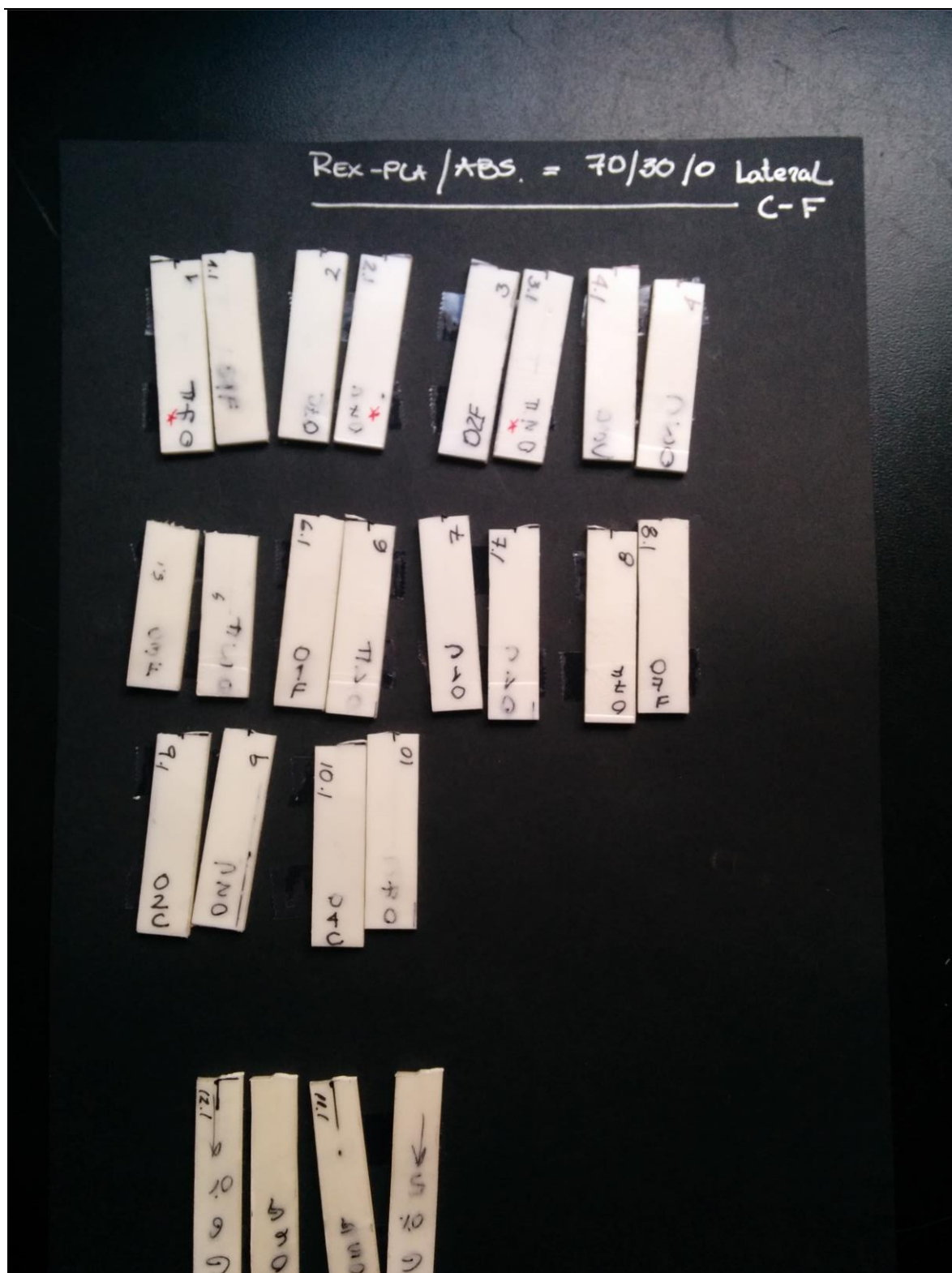
Shape

Values marked * are estimates.
No warranty is given for the accuracy of this data

B. FOTOGRAFIES DE LES PROVETES ASSAJADES

B.1 Resultats de l'assaig d'impacte pendular





1
MTO

2
MTO

3
MTO

4
MTO

5
MTO

6
MTO

7
MTO

8
MTO

9
MTO

10
MTO

11
MTO

12
MTO

13
MTO

14
MTO

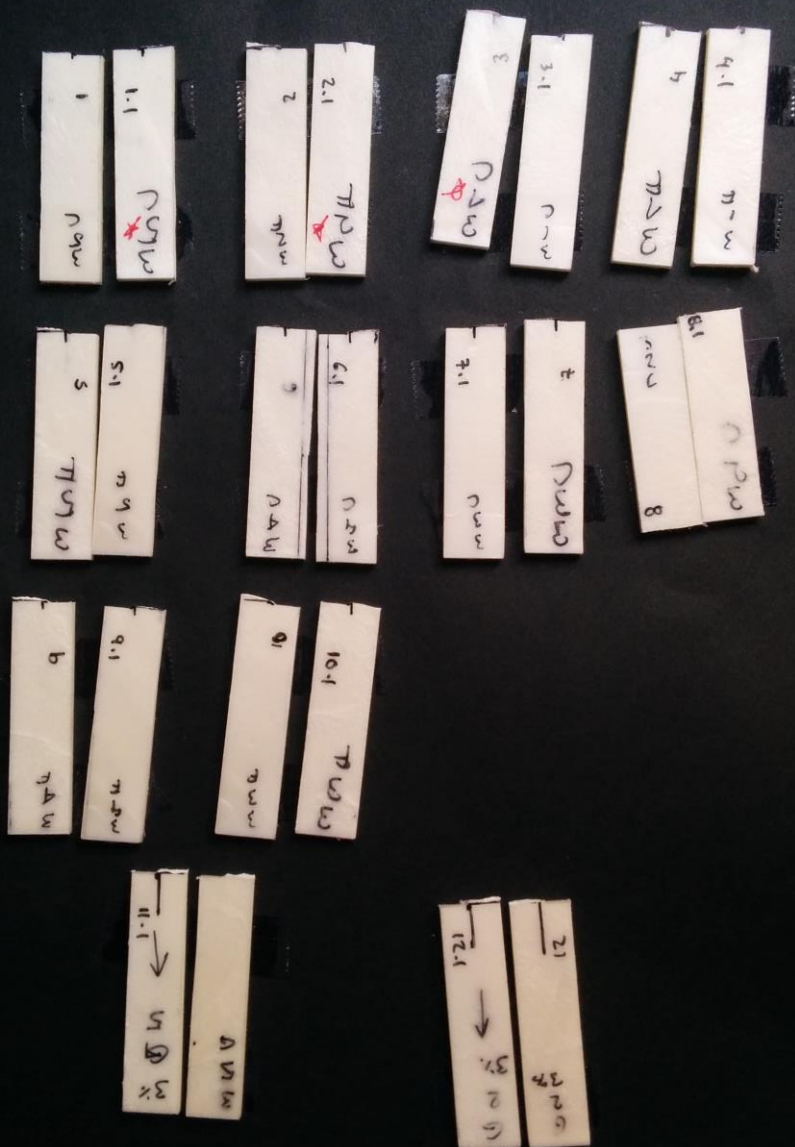
15
MTO

16
MTO

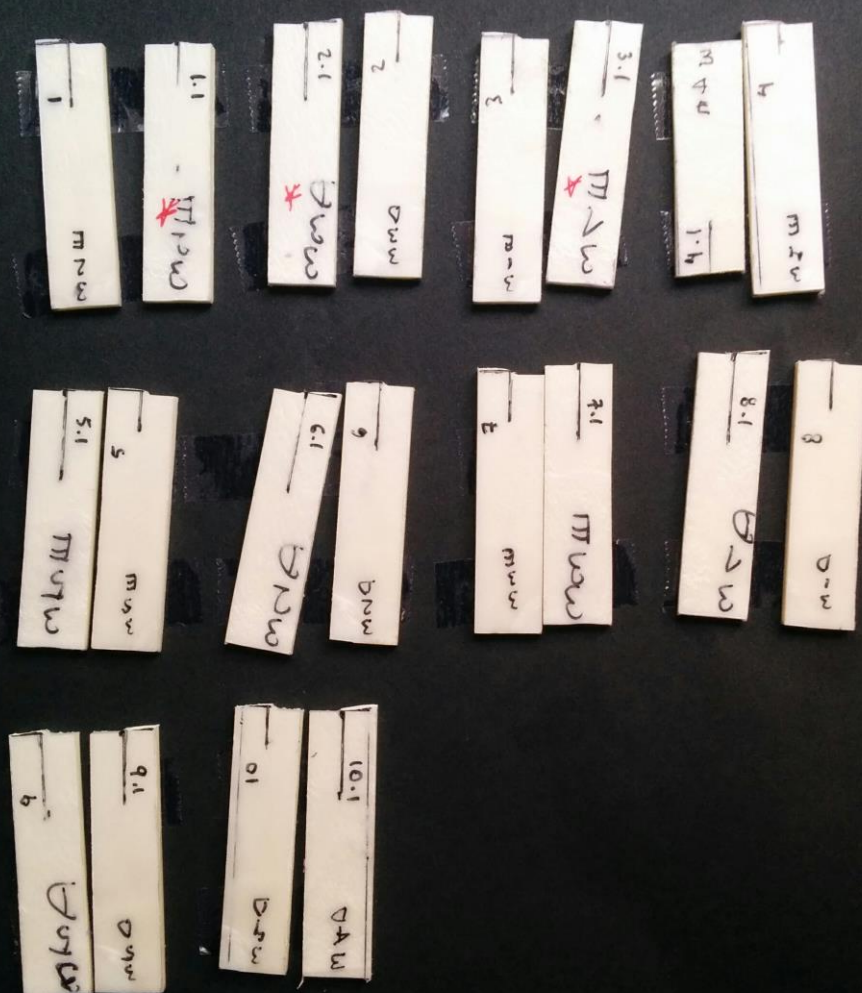
17
MTO

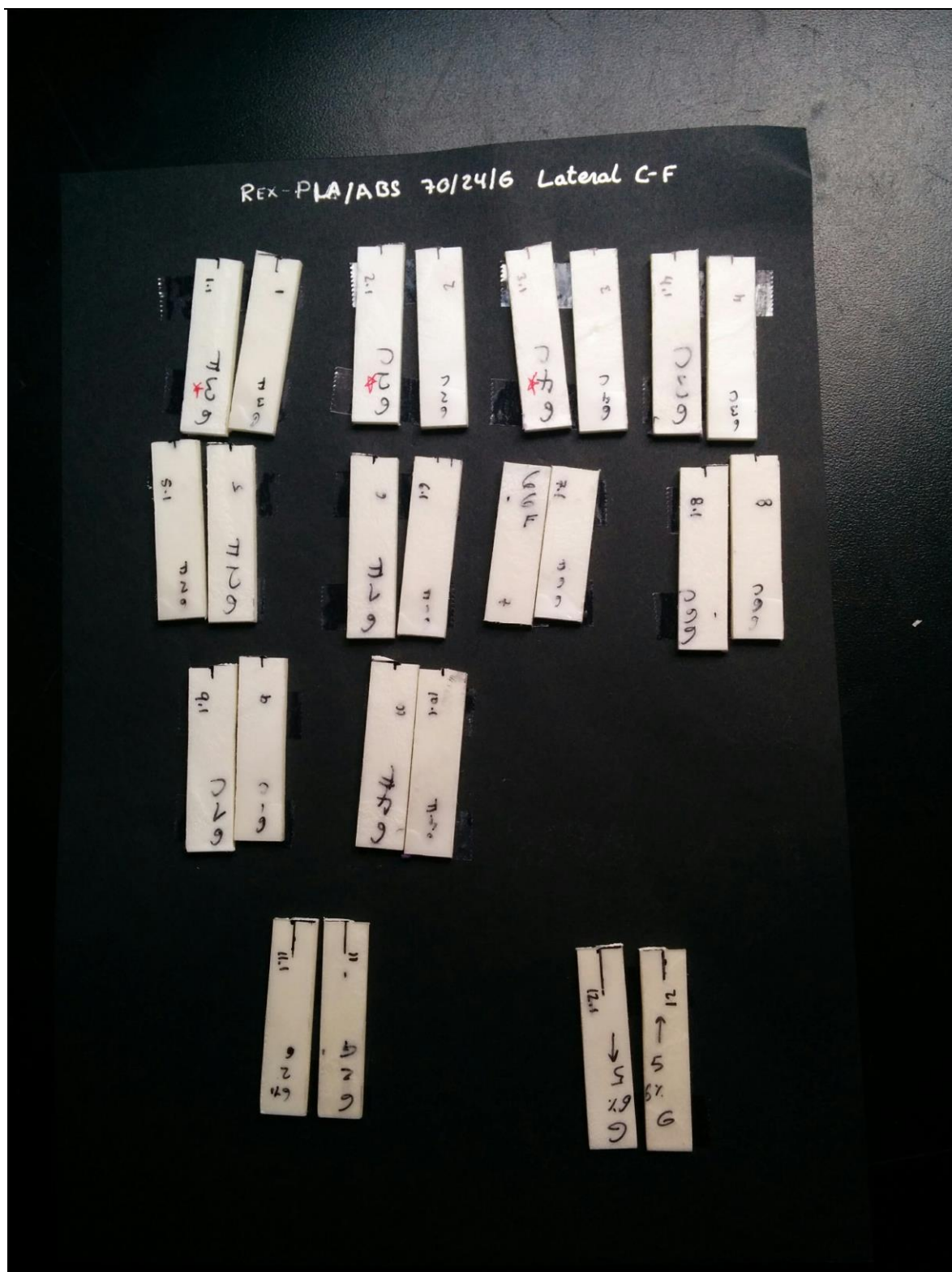
18
MTO

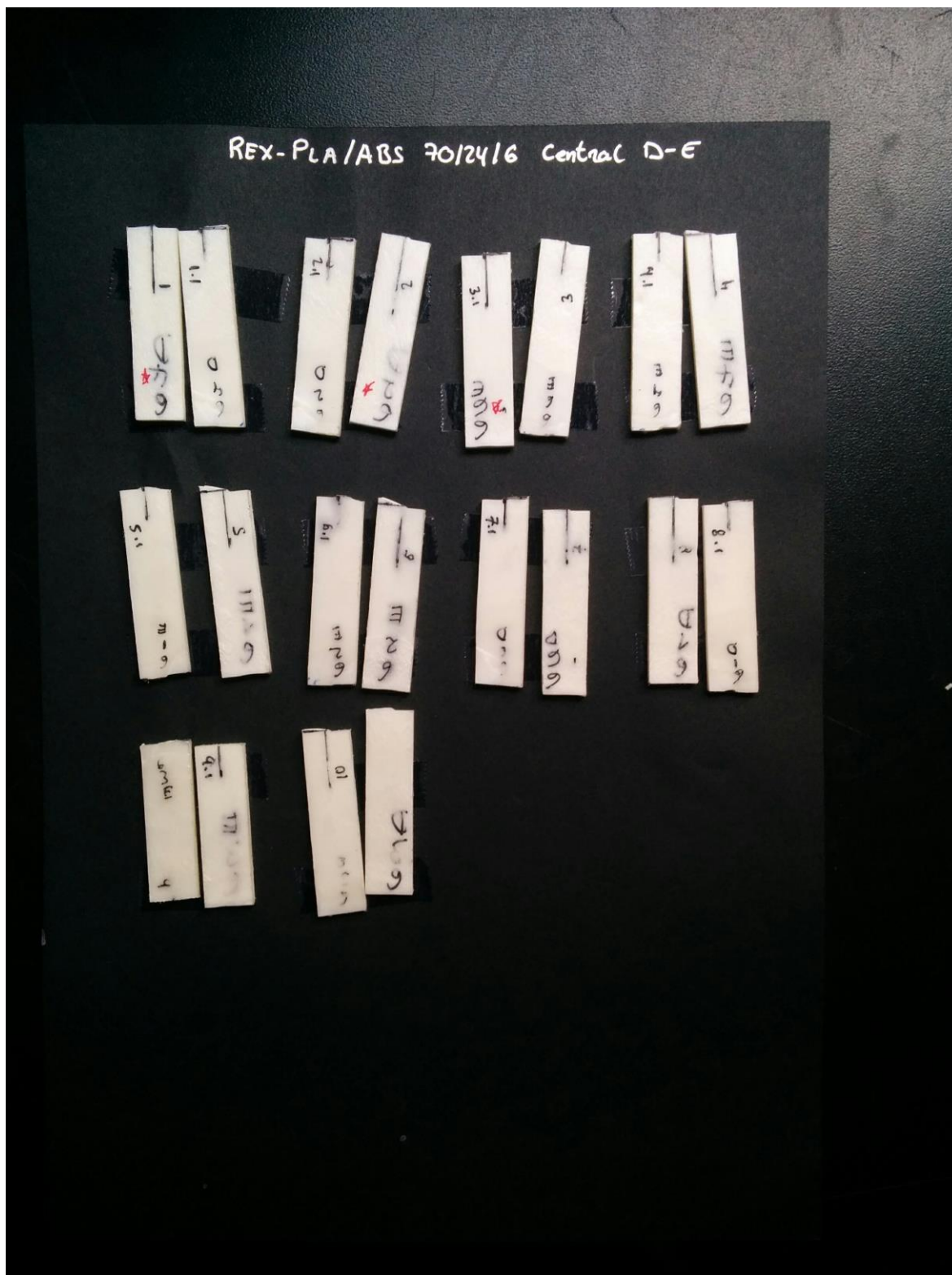
REX-PLA / ABS 70/27/3 Lateral C-F



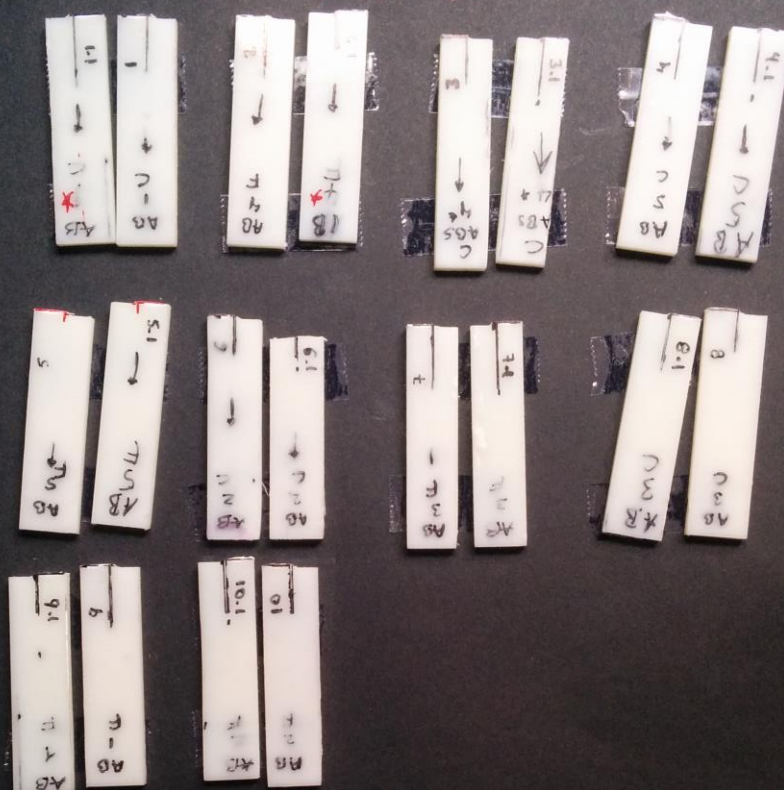
REX-PLA/ABS 70/27/3 Central D-E

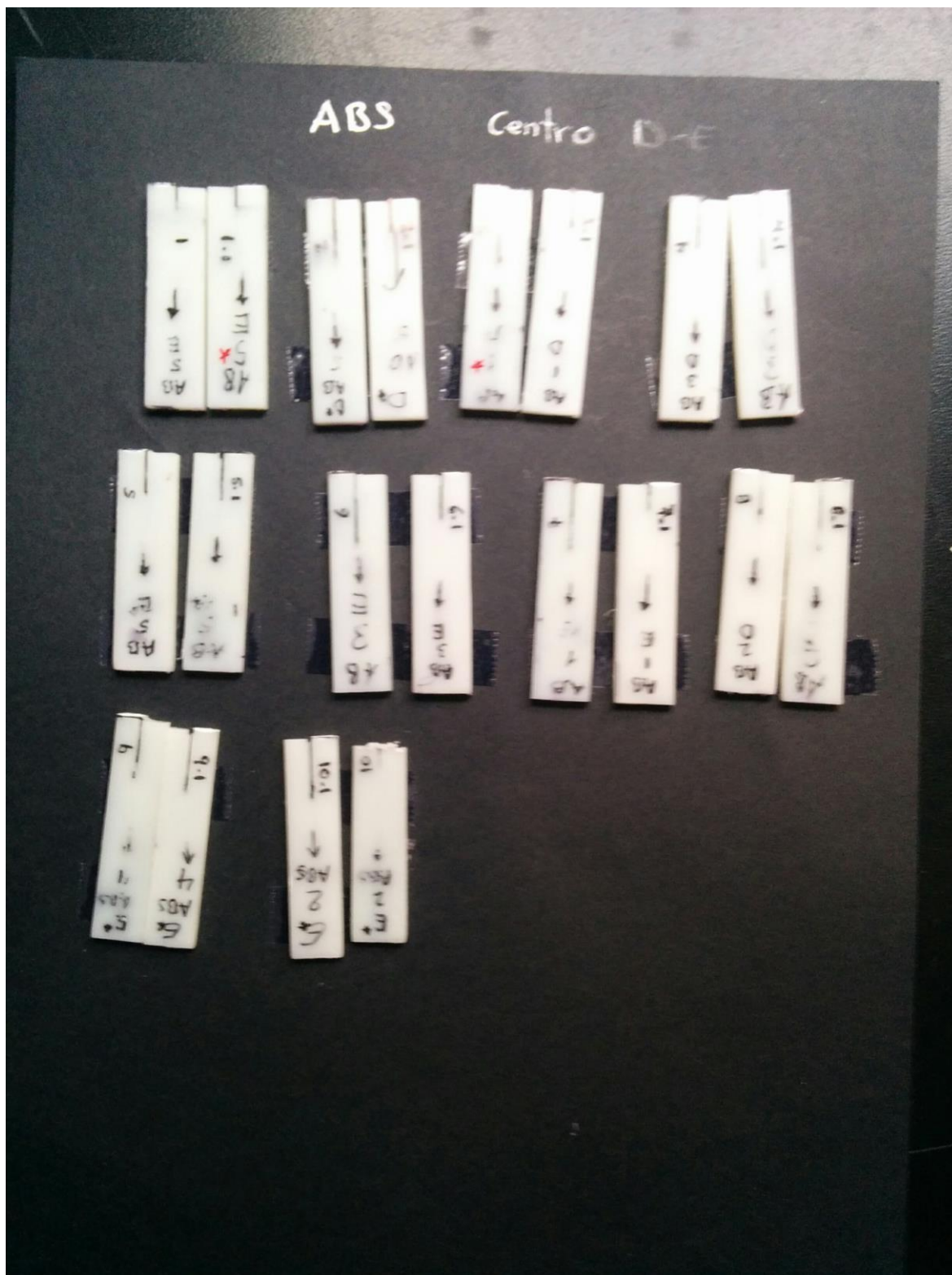




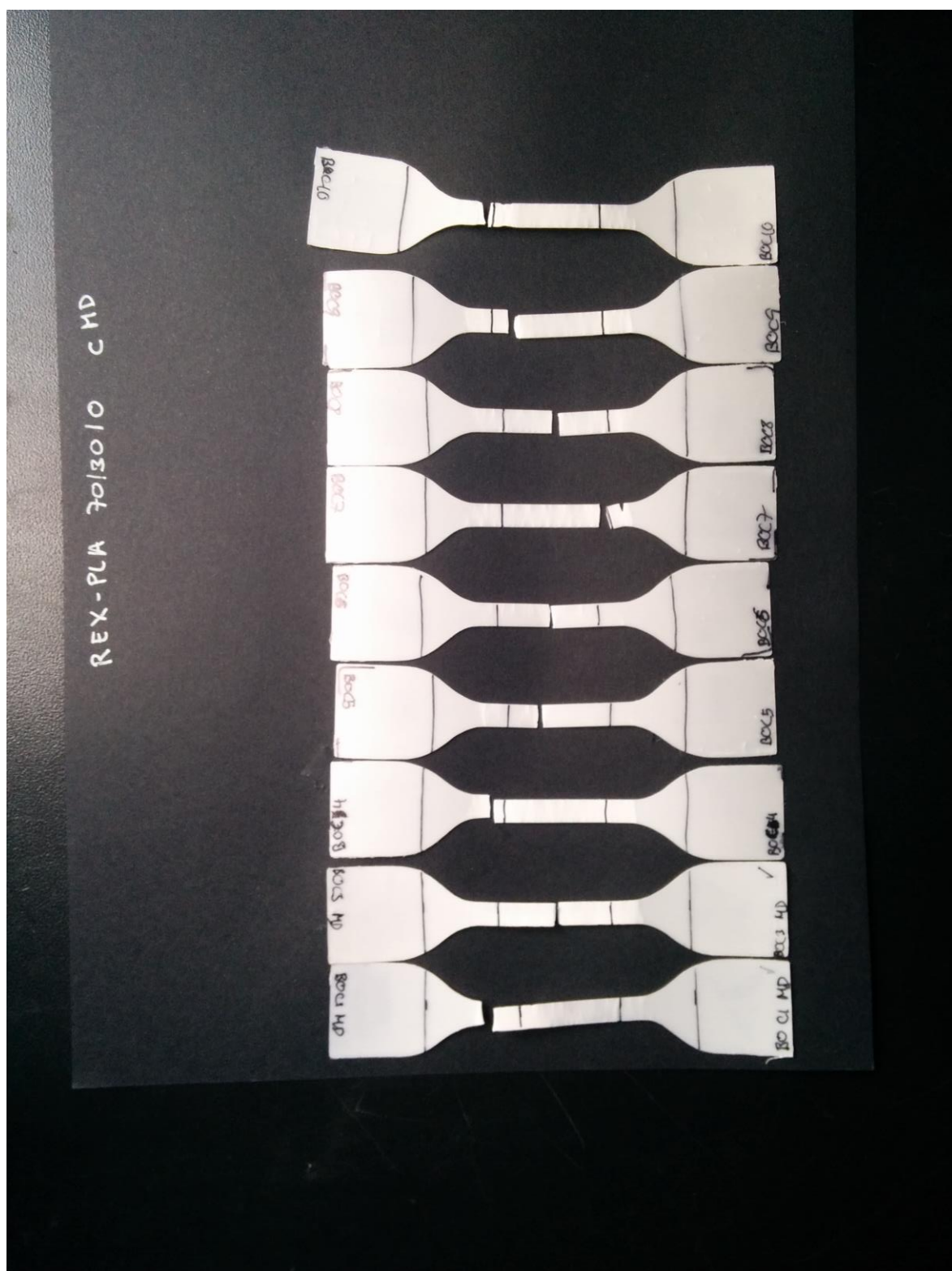


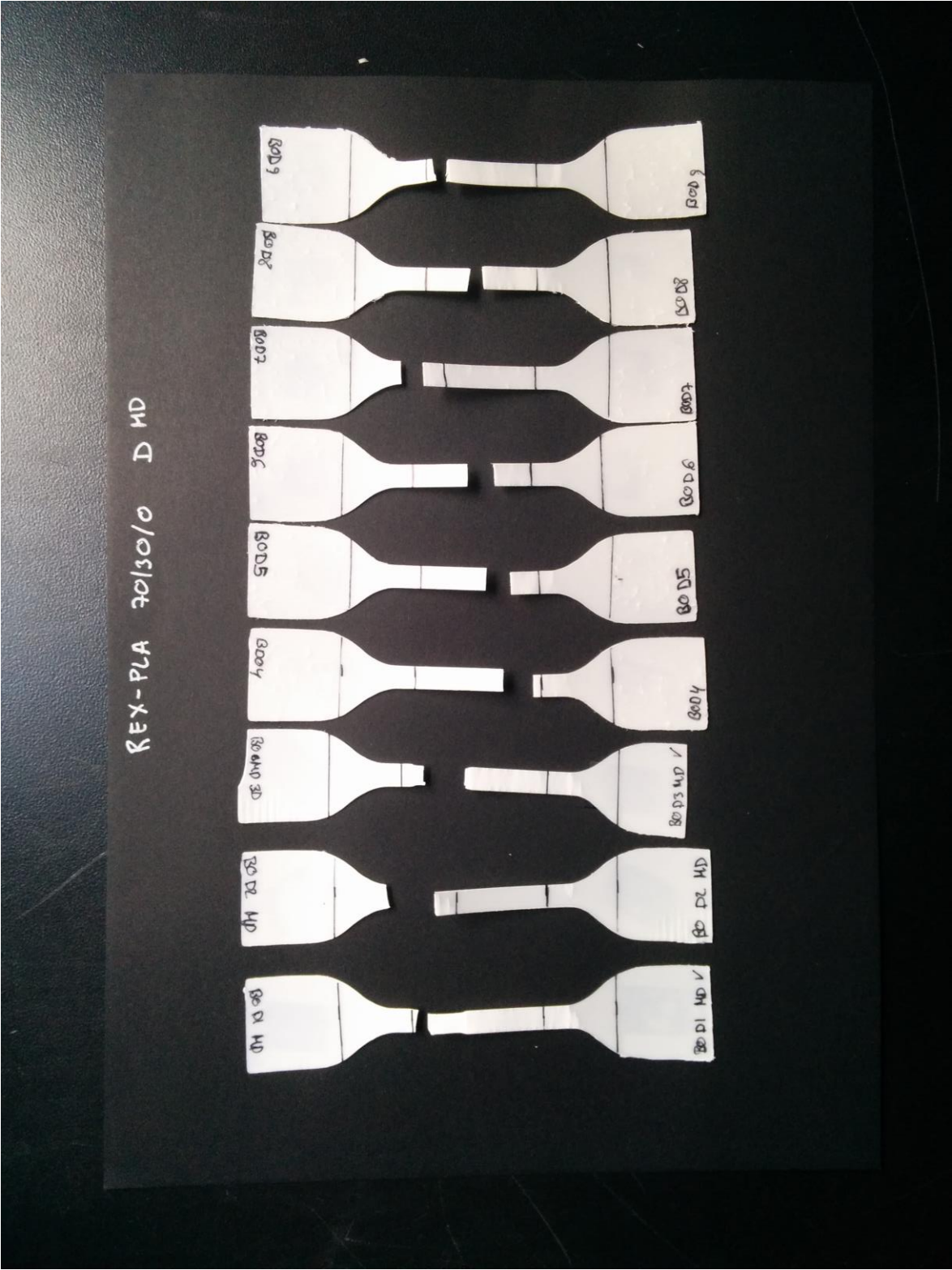
ABS LATERAL C-F

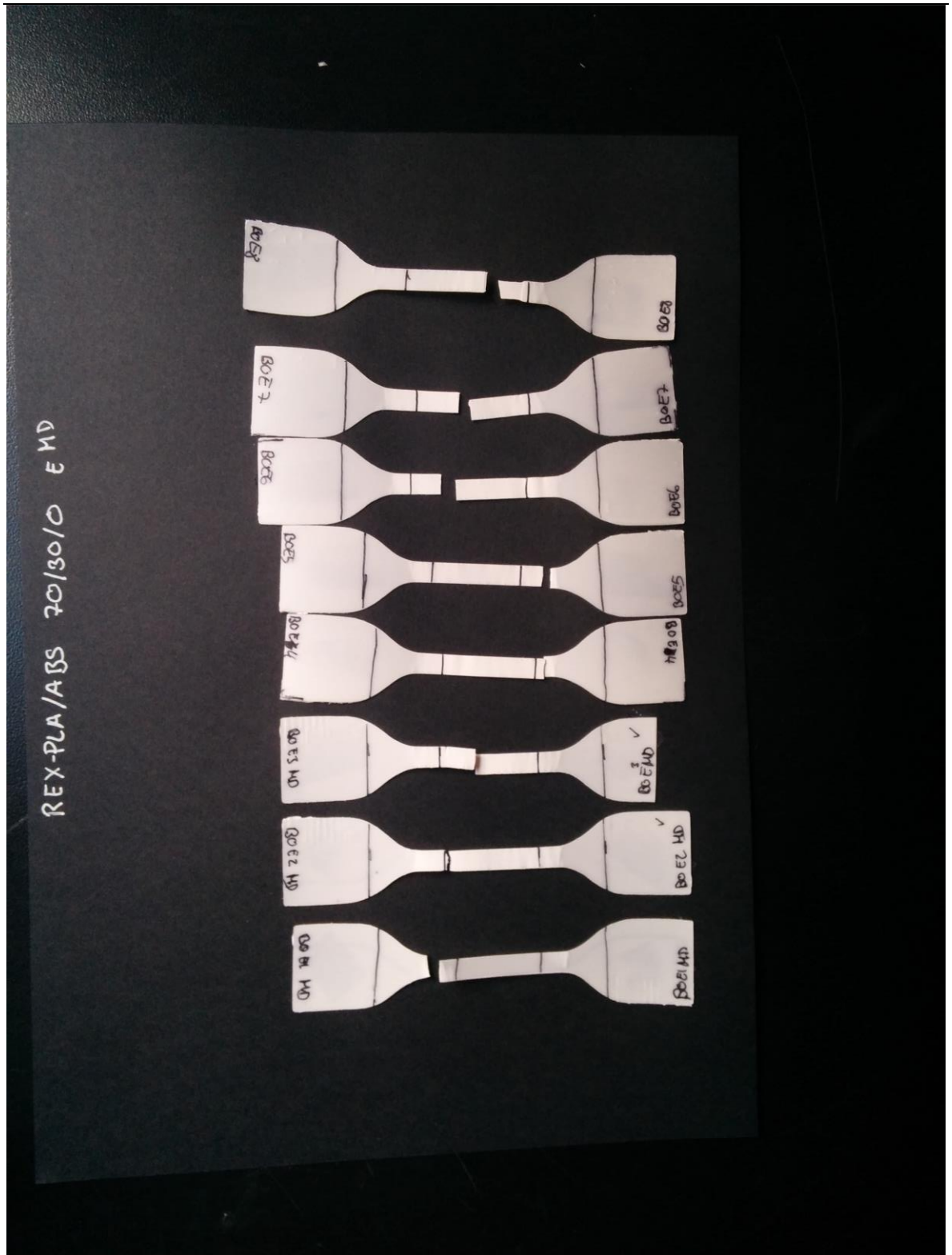




B.2 Resultats de l'assaig de tracció



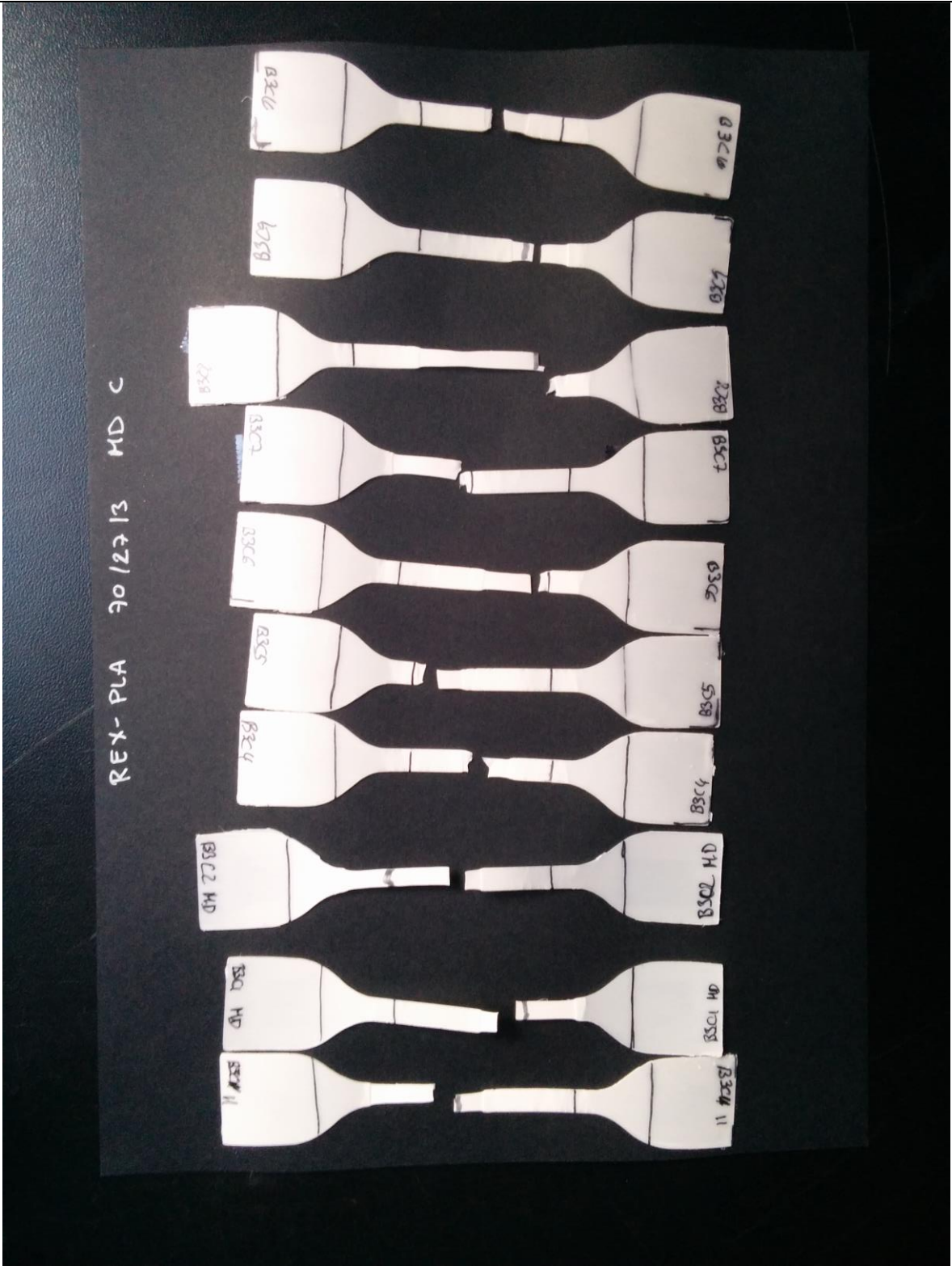






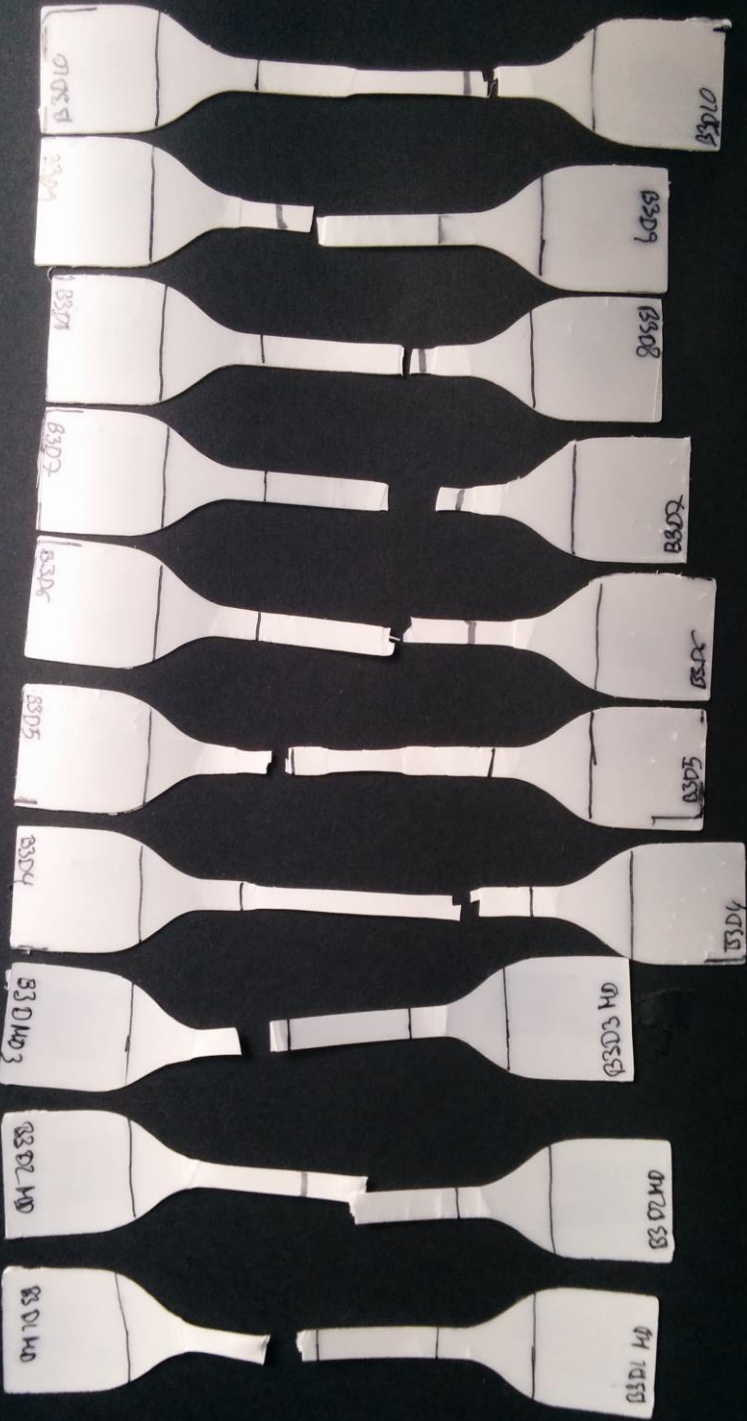
REX-PLA 70/30/0 TD

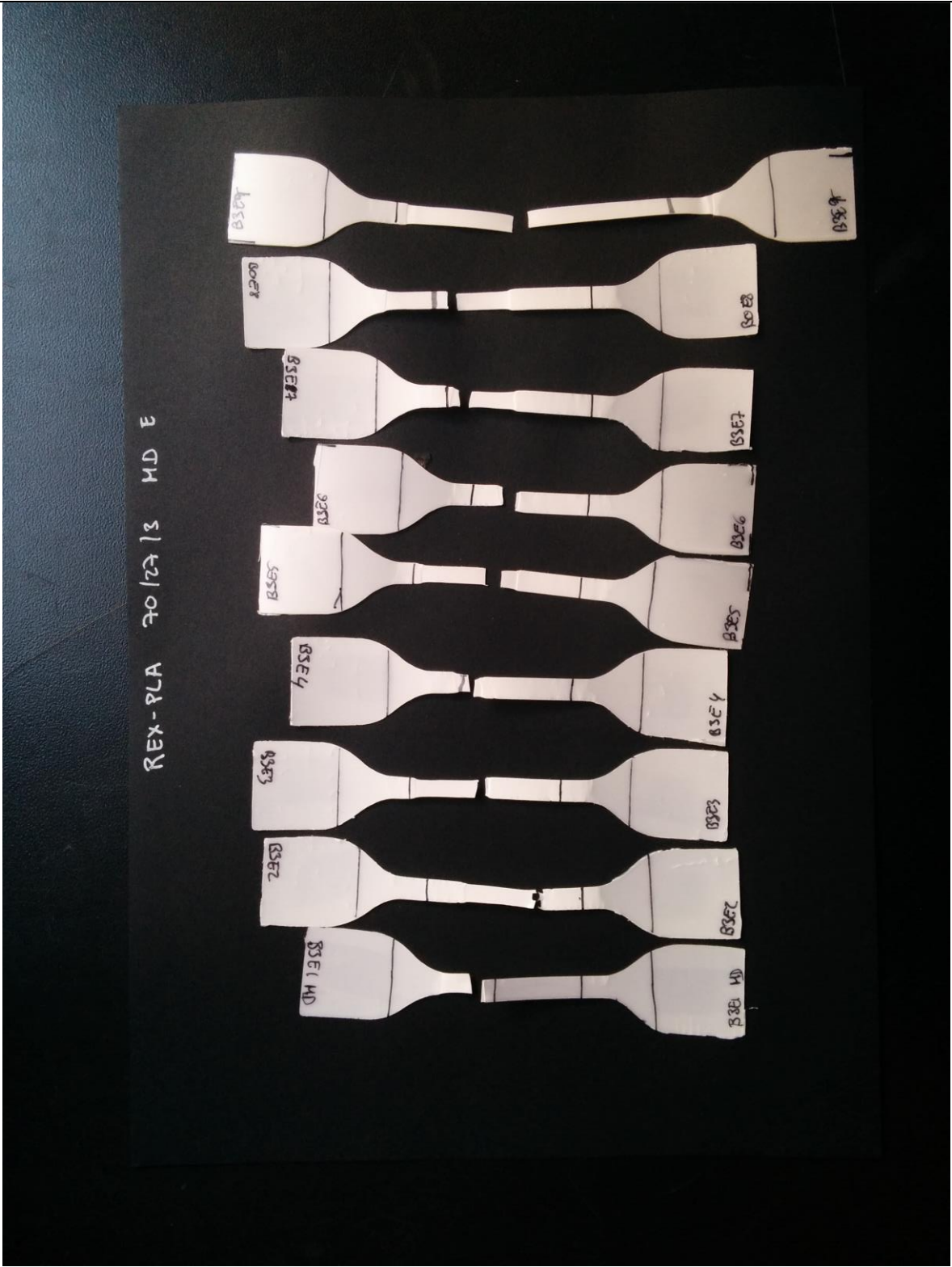
80 TD1 ✓	80 TD2 ✓	80 TD3	80 TD4	80 TD5	80 TD6	80 TD7	80 TD8	80 TD9
80 TD1 ✓	80 TD2 ✓	80 TD3	80 TD4	80 TD5	80 TD6	80 TD7	80 TD8	80 TD9





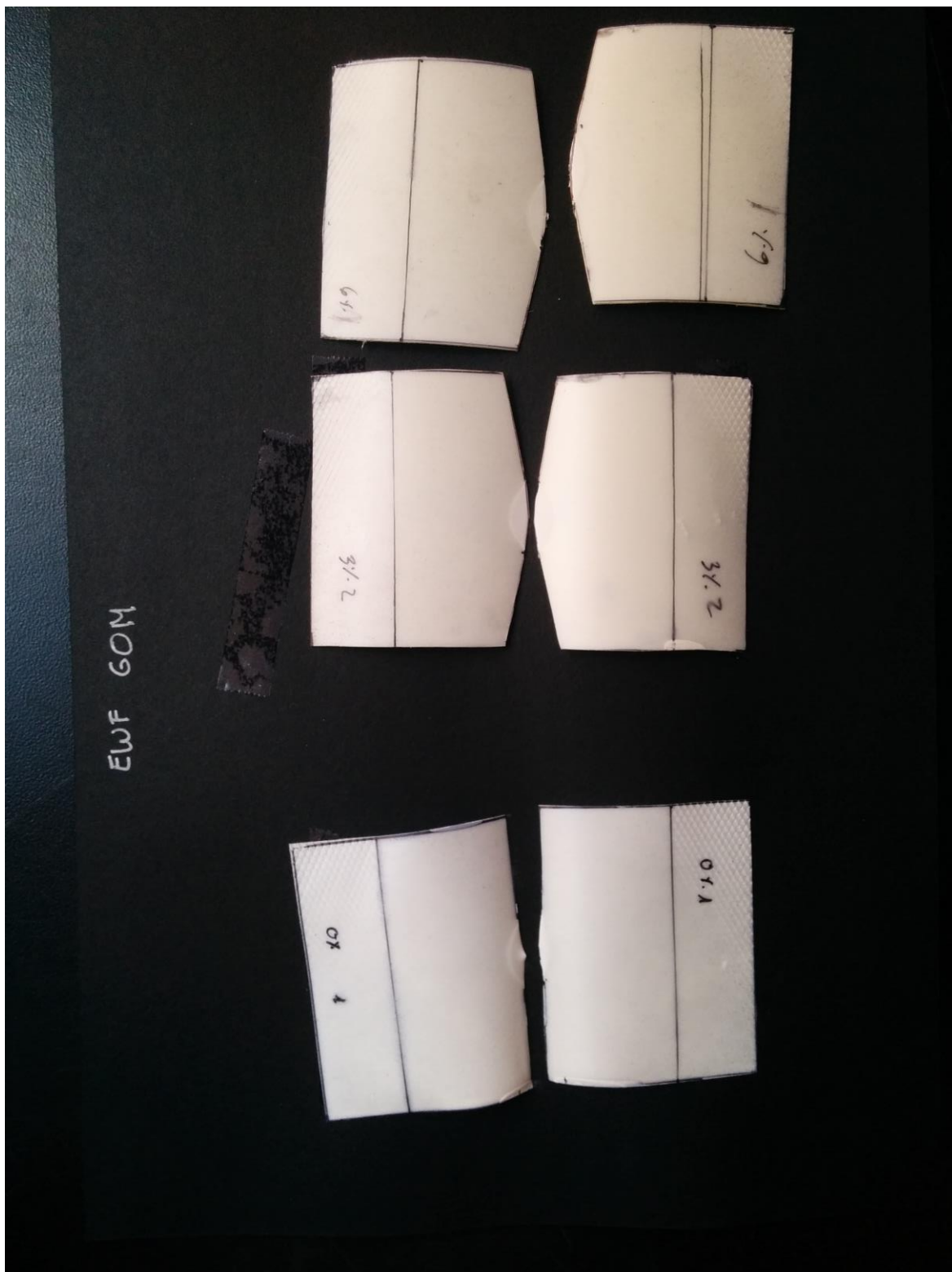
REX-PLA 70/213 MD D

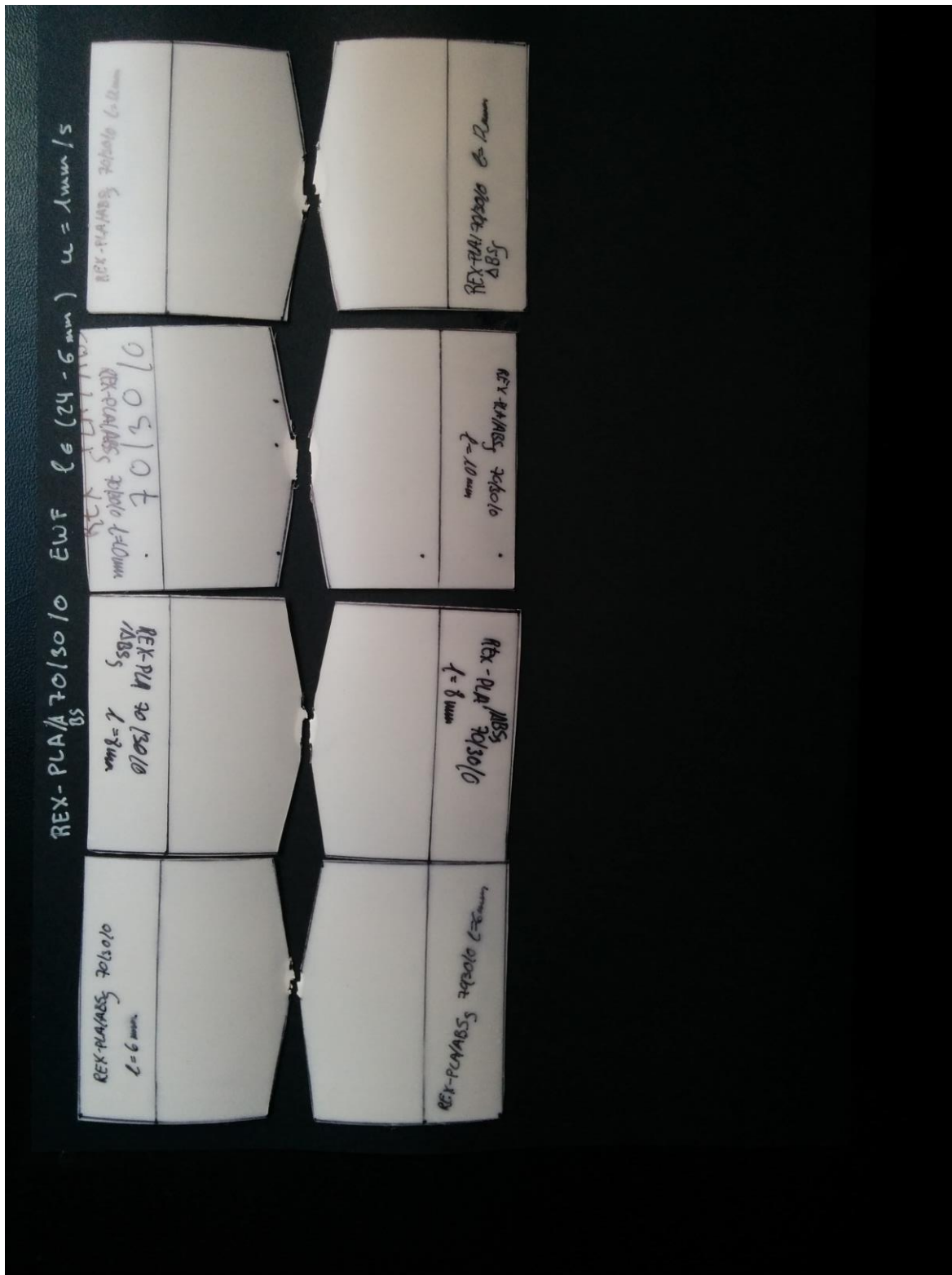






B.3 Resultats de l'assaig de treball essencial de fractura





REX-PLA/ABS 70/30/10 EWF $\ell = 24 - 6 \text{ mm}$ $u = 1 \text{ mm}/5$

REX-PLA/ABS 70/30/10 $\ell = 12 \text{ mm}$

REX-PLA/ABS 70/30/10 $\ell = 10 \text{ mm}$

REX-PLA 30/30/10
ABS $\ell = 8 \text{ mm}$

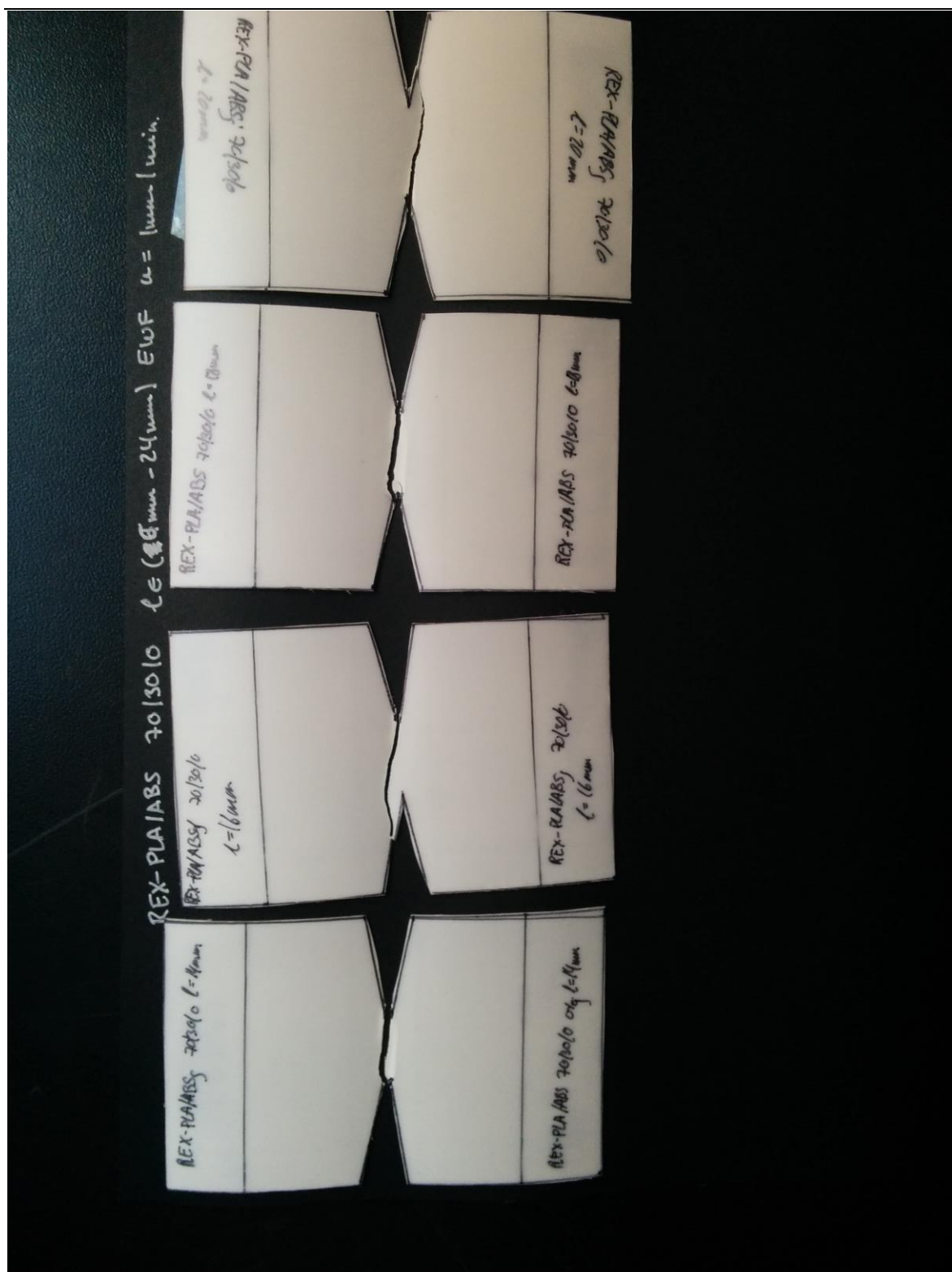
REX-PLA/ABS 70/30/10
 $\ell = 6 \text{ mm}$

REX-PLA/ABS 70/30/10 $\ell = 12 \text{ mm}$

REX-PLA/ABS 70/30/10
 $\ell = 10 \text{ mm}$

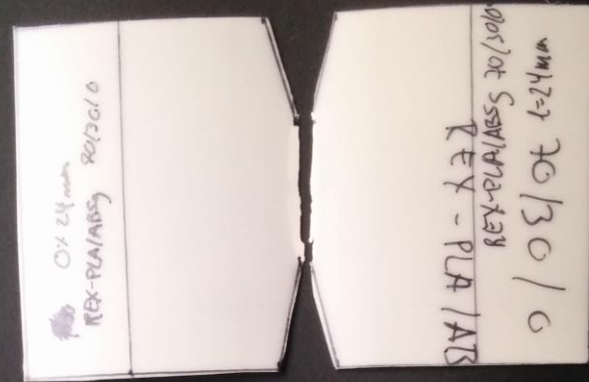
REX-PLA/ABS 70/30/10
 $\ell = 8 \text{ mm}$

REX-PLA/ABS 70/30/10 $\ell = 6 \text{ mm}$

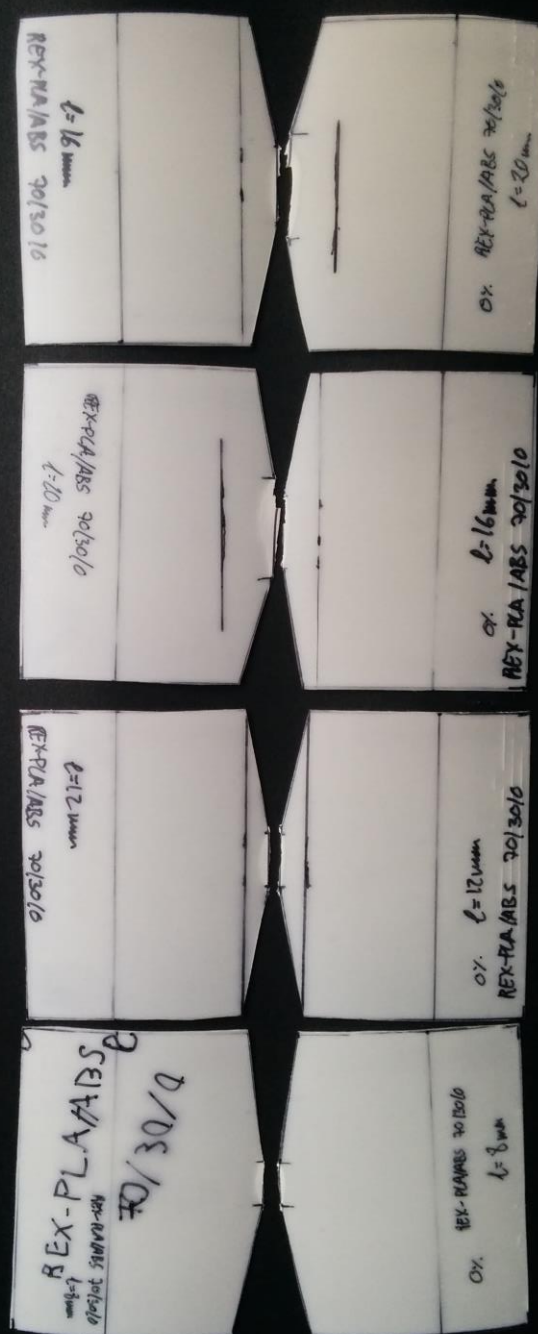


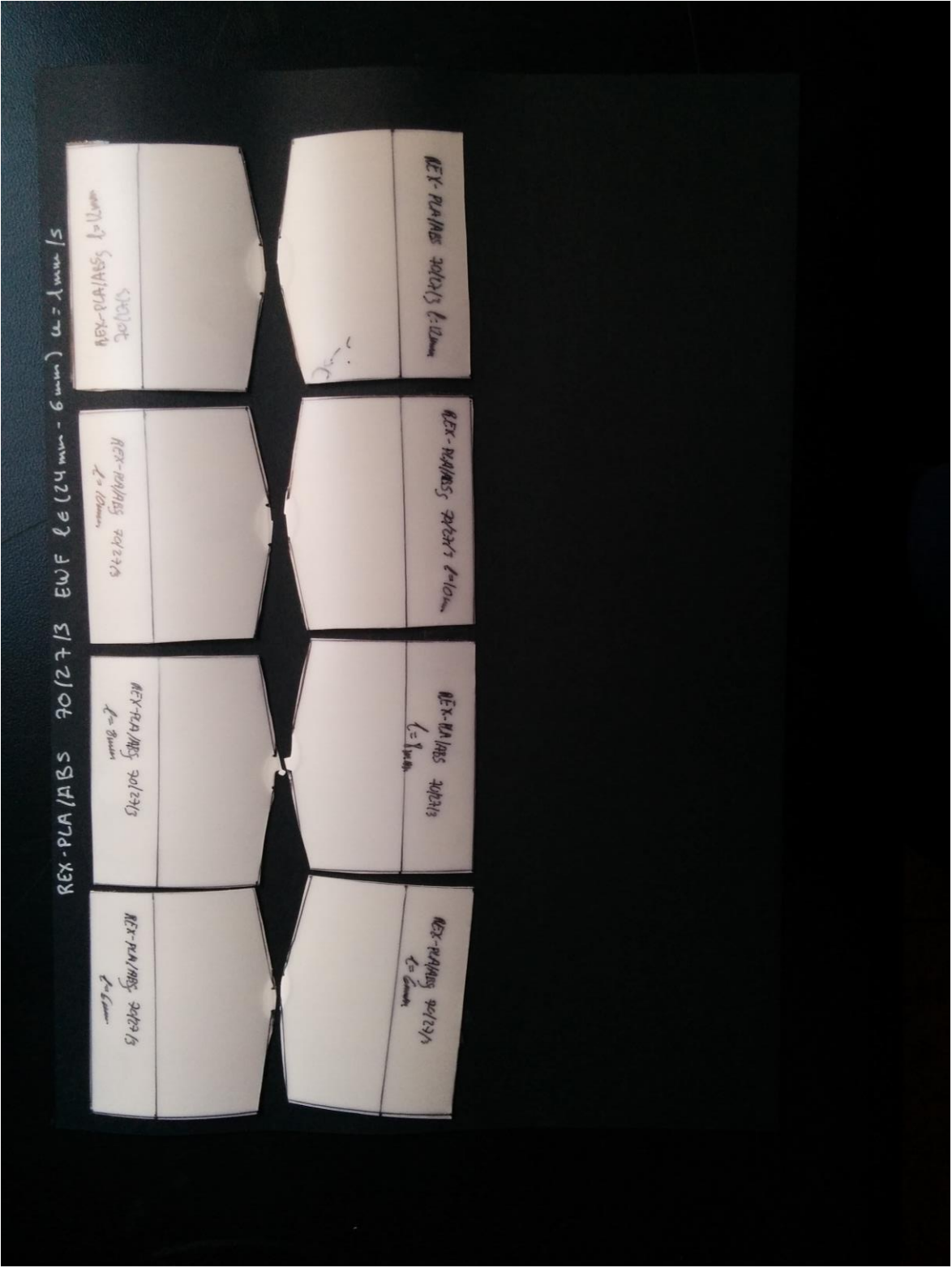
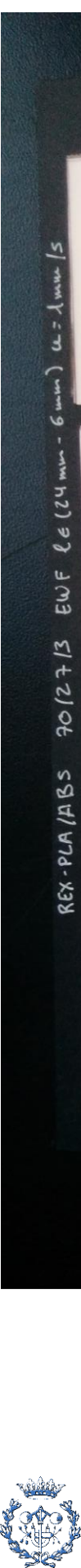


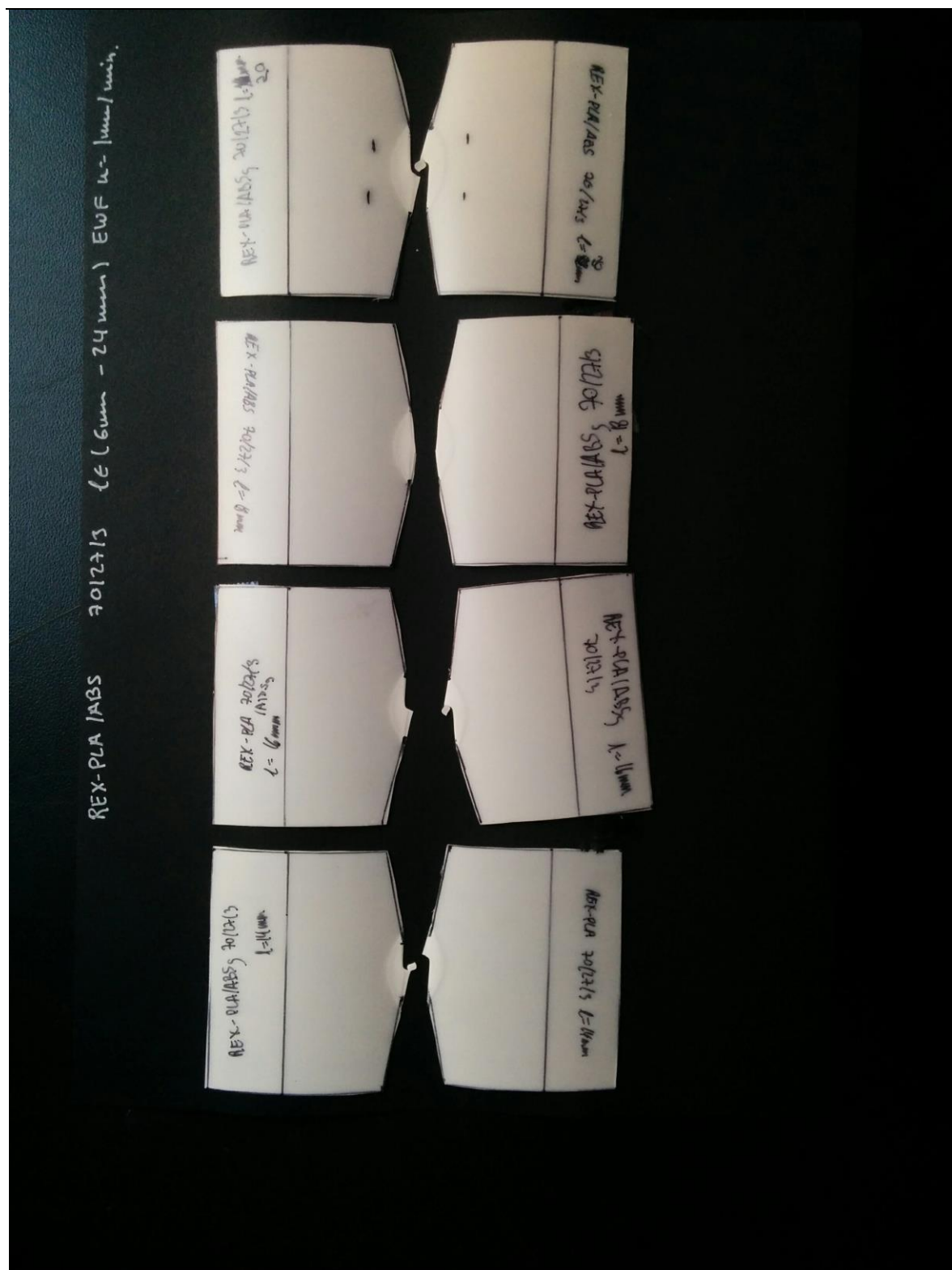
REX-PLA/ABS 70/30/10 $\ell \in (6 \text{ mm} - 24 \text{ mm})$ EWF $u = 1 \text{ mm}$



REX-PLA/ABS 30/30/0 EWF Repetició $l=8, 12, 16, 20$ mm







REX-PLA/ABS 20/20/13 (E(6mm - 24mm) EWF u=1mm/min.

